



Spectroscopie, spectrophotométrie, et morphométrie : mérites et faiblesses pour la caractérisation des populations de galaxies et leur distribution spatiale

Valérie de Lapparent

► To cite this version:

Valérie de Lapparent. Spectroscopie, spectrophotométrie, et morphométrie : mérites et faiblesses pour la caractérisation des populations de galaxies et leur distribution spatiale. Cosmologie et astrophysique extra-galactique [astro-ph.CO]. Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 2011. tel-01121397

HAL Id: tel-01121397

<https://hal.science/tel-01121397>

Submitted on 3 Mar 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Pierre et Marie Curie, Paris 6

NOTICE DE TRAVAUX ET ACTIVITÉS

en vue du diplôme

d'Habilitation à Diriger des Recherches

présentée par

Valérie de Lapparent

**Spectroscopie, spectrophotométrie, et morphométrie :
Mérites et faiblesses pour la caractérisation des
Populations de galaxies et leur distribution spatiale**

A soutenir le 9 juin 2011, à l'Institut d'Astrophysique de Paris

par devant les membres du jury

Chantal Balkowski	Astronome, GEPI, Observatoire de Meudon	Rapporteure
Andrea Biviano	Chargé de recherche, Observatoire de Trieste	Rapporteur
Alessandro Boselli	Directeur de recherche, Lab. d'Astrophysique de Marseille	Examineur
Guilaine Lagache	Astronome, Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay	Rapporteure
Gary Mamon	Astronome, Institut d'Astrophysique de Paris	Examineur
Sophie Maurogordato	Chargée de recherche, Observatoire Nice-Côte d'Azur	Examinatrice

Table des matières

I	PRÉAMBULE	5
	Remerciements	9
	Synthèse en français	11
	Synthèse en anglais	13
	Introduction générale	15
II	LE RELEVÉ SPECTRAL ESO-SCULPTEUR	17
1	Acquisition des données	19
1.1	Collaborateurs	19
1.2	L'opportunité nouvelle des programme-clés	19
1.3	Motivations et contexte scientifique	20
1.4	Observations	20
1.4.1	Choix du champ sur le ciel	20
1.4.2	Choix d'un relevé digital	21
1.4.3	Choix des instruments d'observation	21
1.4.4	Stratégie d'observation	22
1.4.5	Choix des filtres et des magnitudes limites des catalogues	23
1.4.6	Répartition temporelle et déroulement des observations	23
2	Traitements et catalogues	25
2.1	Collaborateurs	25
2.2	Catalogue photométrique	26
2.3	Catalogue spectroscopique	27
2.4	Calibration en flux, classification spectrale, et corrections-k	29
2.5	<i>Article choisi n° 1</i>	31
3	Structuration à grande échelle	53
3.1	Introduction	53
3.2	Un pinceau à travers la toile cosmique	55
3.3	<i>Article choisi n° 2</i>	59

3.4	Fonctions de corrélation par type	67
3.5	<i>Article choisi n° 3</i>	69
3.6	Fluctuations à très grande échelle	93
3.7	Comparaison avec les simulations du Millennium	97
4	Décalages et types photométriques	109
4.1	Comparaison des décalages spectraux	109
4.2	Comparaison des types spectraux	111
4.3	Effets dus à l'orientation des fentes	113
4.4	Détection des fluctuations à très grande échelle	116
5	Fonctions de luminosité et évolution	119
5.1	Introduction	119
5.2	Collaborateurs	120
5.3	Fonctions de luminosité par classe spectrale	120
5.4	<i>Article choisi n° 4</i>	123
5.5	Biais dans les fonctions de luminosité par type	155
5.6	<i>Article choisi n° 5</i>	157
5.7	Evolution des galaxies spirales tardives	187
5.8	<i>Article choisi n° 6</i>	189
6	Suivi en infrarouge-moyen avec ISO	215
6.1	Introduction	215
6.2	Collaborateurs	215
6.3	Catalogue à $12\mu\text{m}$	215
6.4	Modélisation des comptages à $12\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$	217
6.5	Propriétés des sources à $12\mu\text{m}$	218
	Références	225
III	LE CATALOGUE MORPHOLOGIQUE EFIGI	231
1	Introduction	233
1.1	Les catalogues morphologiques	233
1.2	Liens entre les caractéristiques spectrales et morphologiques des galaxies	233
1.3	Statut actuel de la morphométrie des galaxies	234
2	Morphologie visuelle	237
2.1	Collaborateurs	237
2.2	Echantillon étiqueté EFIGI	238
2.3	<i>Article choisi n° 7</i>	241
2.4	Description statistique de la séquence de Hubble	271
2.5	Galaxies naines spirales	273
2.6	<i>Article choisi n° 8</i>	275

3	Morphologie automatique	297
3.1	Erreurs de photométrie dans le relevé SDSS	297
3.2	Séquence couleur-magnitude	301
3.3	Comparaison avec les types spectro-photométriques	304
3.4	Fonctions de luminosité par type	307
3.5	Couleurs des bulbes et disques	312
	Références	312
IV	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	317
	Références	325
V	EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE ET PUBLICATIONS	327
	Curriculum Vitae	329
1	Expérience professionnelle	331
1.1	Encadrement	331
1.1.1	Stagiaires	331
1.1.2	Doctorants	331
1.1.3	Post-Doctorants	331
1.2	Responsabilités scientifiques	331
1.3	Animation de la recherche	332
1.4	Responsabilités administratives	332
1.5	Diffusion de la connaissance scientifique	332
1.5.1	Conférences grand public	333
1.5.2	Conférences d'éveil et de formation	334
2	Publications	337
	Liste des articles choisis	343

Première partie

PRÉAMBULE

“Les Nébuleuses.
A qui parles-tu donc, flocon lointain qui passes?
A peine entendons-nous ta voix dans les espaces.
Nous ne te distinguons que comme un nimbe obscur
Au coin le plus perdu du plus nocturne azur.
Laisse-nous luire en paix, nous, blancheurs des ténèbres,
Mondes spectres éclos dans les chaos funèbres,
N’ayant ni pôle austral ni pôle boréal;
Nous, les réalités vivant dans l’idéal,
Les univers, d’où sort l’immense essaim des rêves,
Dispersées dans l’éther, cet océan sans grèves,
Dont le flot à son bord n’est jamais revenu;
Nous les créations, îles de l’inconnu !”

Victor Hugo

“Abîmes”, “La légende des Siècles” (1877)

“A certain amount of vastness constitutes majesty. More than that seems insane.”

John Updike

“At the hairy edge of the possible”, “More Matters. Essays and criticism” (1999).

Remerciements

Je salue l'enthousiasme d'André Brahic sur lequel je me suis appuyée pour me maintenir dans la voie de l'astrophysique, malgré les fortes incitations venant de l'Ecole Normale Supérieure pour une orientation en chimie, puis en physique fondamentale des systèmes quantiques. C'est Bernard Jones qui m'a donné, au cours d'un stage sur la modélisation à N-corps de la fusion des galaxies, le goût de l'étude de ces systèmes grandioses et complexes, et qui m'a suggéré de prendre contact avec les chercheurs de Harvard.

Je ne peux m'empêcher de penser à Margaret Geller, au regretté John Huchra, et à Irwin Shapiro. De façon unanime, ils ont accepté de m'accueillir au Harvard-Smithsonian CfA et m'ont permis de concrétiser pendant ma thèse ce vif désir d'observer et de cartographier la distribution des galaxies à grande échelle, puis d'en mesurer les propriétés statistiques. Margaret et John m'ont imprégnée d'un niveau d'exigence dans l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données qui me poursuit quotidiennement.

Après les cinq années passées à Cambridge, l'accueil chaleureux de Jean Audouze, Daniel Kunth et Jean-François Sygnet à l'IAP m'a aidé à intégrer progressivement le laboratoire, où j'ai découvert l'intelligence et le dévouement du personnel administratif et technique.

Je remercie sincèrement mes collaborateurs Christelle Bellanger, Stéphane Arnouts, Gaspar Galaz et Sandro Bardelli pour leur participation compétente et efficace au programme-clé de l'ESO, grâce à laquelle le projet a pu aboutir et tirer tout le profit de ces nombreuses nuits de télescope sur le NTT à La Silla, ceci malgré la quasi-absence d'aide technique aux observations et au traitement des données. Leur intérêt scientifique pour ce projet jusqu'à son terme m'ont aidé à tenir bon pendant les années ingrates du traitement des données de spectroscopie multi-objet.

Je remercie tout particulièrement Emmanuel Bertin pour nos échanges quotidiens autour de nos projets communs, dont le niveau d'exigence n'a jamais pesé sur la confiance et les égards mutuels. Je ne peux que lui exprimer ma joie de pouvoir mener, grâce à notre collaboration, des recherches de "rêve" : analyser les meilleures images astronomiques au moyen de logiciels à l'avant-garde de l'analyse des sources, dans le but de déchiffrer les secrets de l'évolution des galaxies.

Je suis reconnaissante envers Yannick Mellier pour le travail monumental qu'il a effectué en initiant et en coordonnant le centre TERAPIX de traitement des grandes images provenant du TCFH, qui nous fournit ces images magnifiques des champs du CFHTLS, ainsi qu'envers Laurent Vigroux pour avoir joué un rôle clé dès le début de ce projet phare pour la communauté internationale. De nombreuses questions astrophysiques n'ont pas encore été explorées via ces données, et la collaboration démarrée à l'IAP avec Emmanuel Bertin, Damien Le Borgne et Michel Fioc me promet que notre curiosité sera satisfaite.

Je tiens par ailleurs à exprimer ma gratitude à Florence Durret, Roya Mohayaee et Jacques Colin pour leur soutien professionnel et amical durant les années passées, ainsi qu'à Johanna et Frédéric pour leur soutien moral inestimable. Mes pensées vont aussi vers les personnes remarquables, dont tout particulièrement René Cavaroz, qui veillent à la diffusion de la connaissance de l'astrophysique auprès des scolaires, des enseignants et du grand public, et m'invitent régulièrement à transmettre mon savoir dans les diverses conférences qu'ils organisent. Enfin, je remercie vivement mes trois rapporteurs Chantal Balkowski, Guilaine Lagache et Andrea Biviano, pour avoir accepté de prendre en charge le long de travail de lecture et d'appréciation de ce mémoire.

Synthèse en français

Le programme-clé ESO-Sculpteur a fourni le tout premier catalogue avec photométrie CCD et spectroscopie de fente pour un relevé systématique d'environ un millier de galaxies. Son taux de complétude élevé permet une cartographie fiable des vides et feuillets interceptés le long de la ligne de visée jusqu'à $z \simeq 0.5$. En distinguant les populations de galaxies géantes et naines, nous proposons des analyses originales des fonctions de luminosité et de corrélation, ainsi que la détection d'une évolution marquée des galaxies spirales tardives et des irrégulières. Un suivi infrarouge moyen permet de déduire une modélisation des comptages avec évolution "minimale".

Une sur-densité est détectée à $z \simeq 0.44$ dans le relevé ESO-Sculpteur, précédée par une sous-densité à $z \sim 0.36$. Ces structures définissent des régions de contraste ~ 2 sur 170 à 200 Mpc le long de la ligne de visée. En prenant en compte le regroupement spatial mesuré des galaxies, on évalue le niveau de significativité de la sur-densité à 2.6 à 3.3σ . Si elle s'étendait transversalement sur $2 \times 2 \text{ deg}^2$, cette structure pourrait atteindre un niveau de significativité de 4 à 5σ . Des pinceaux profonds ayant la même géométrie sur le ciel que le relevé ESO-Sculpteur sont extraits des simulations "Millennium", et confirment que la probabilité de détecter une telle sur-densité dans un volume cosmologique est de l'ordre du pourcent.

En outre, je teste les performances des méthodes de décalages vers le rouge "photométriques" pour la détection de ces très grandes fluctuations de densité, en complétant la photométrie optique par la photométrie infrarouge simulée par ZPEG à partir des mesures optiques et des ajustements des scénarios évolutifs de PÉGASE.2. On montre que les biais systématiques dans l'ajustement des spectres peuvent empêcher la détection des très grandes structures, même si les erreurs aléatoires de la photométrie causent un étalement en décalage spectral sur des échelles bien inférieures. On compare aussi les performances des ajustements de spectres synthétiques avec la classification spectrale par composante principale. Je montre enfin la présence d'effets systématiques sur la classification spectrale causés par l'orientation des fentes de spectroscopie.

Je présente ensuite les caractéristiques du catalogue morphologique de galaxies proches EFIGI. Par l'ajustement de profils convolués à double composante de bulbe et de disque, nous dérivons de nouvelles magnitudes totales qui mettent en évidence des pertes de flux de 0.5 à 10 magnitudes dans les mesures photométriques produites par le relevé SDSS pour ces objets proches; celle-ci sont causées par un mauvais ajustement du fond de ciel autour des grandes galaxies, et par un morcellement des objets sans bulbe dominant. Ces nouvelles mesures exhibent un décalage continu dans le diagramme couleur-magnitude des différents types morphologiques de galaxies, qui contraste avec la notion de bi-modalité. Je montre aussi que les couleurs des bulbes des galaxies spirales sont proches des couleurs des galaxies elliptiques, avec un rougissement des bulbes des galaxies Sb et Sbc, les plus riches en poussières. En revanche, on observe un bleuissement progressif des couleurs des disques, depuis ceux des lenticulaires, de même couleur que leurs bulbes, vers les disques des spirales les plus tardives.

J'utilise ainsi les catalogues ESO-Sculpteur et EFIGI pour illustrer les enjeux et difficultés dans la caractérisation des différents types de galaxies dans l'Univers proche et lointain par une analyse des fonctions de luminosité. Celles-ci sont biaisées par les confusions entre les différents types morphologiques de galaxies qui se produisent lorsque la séparation est basée sur la classification spectrale, sur les couleurs, ou sur les types spectro-photométriques. Ces effets peuvent avoir des répercussions majeures dans la dérivation de contraintes observationnelles sur l'évolution des galaxies.

Synthèse en anglais

Introduction générale

A l'aube du 21^{ème} siècle, les astrophysiciens ont obtenu des réponses à plusieurs questions fondamentales sur l'Univers qui nous entoure. L'observation du rayonnement cosmologique à 2.7° K a permis de préciser les propriétés des fluctuations primordiales de densité et les paramètres cosmologiques (Bennett et al. 1996; MacTavish et al. 2006; Dunkley et al. 2009). Ces résultats sont en bon accord avec l'expansion accélérée de l'Univers mise en évidence par l'observation des supernovae maintenant (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999), et les mesures de la constante de Hubble par l'observation des céphéides avec le Hubble Space Telescope (Freedman et al. 2001). Ces observations cosmologiques sont par ailleurs cohérentes avec la répartition des galaxies à grande échelle dans le cadre d'un effondrement gravitationnel de fluctuations gaussiennes du champ de matière, comme le révèlent les distortions dans l'espace des décalages vers le rouge (Hawkins et al. 2003; Guzzo et al. 2008). La distribution des galaxies recèle en outre des informations mesurables sur les oscillations baryoniques acoustiques, témoins des premiers instants de l'Univers (Eisenstein et al. 2005; Percival et al. 2007), et qui confirment le rôle de la gravitation et de la matière noire dans la formation des structures, et qui fournissent une échelle standard qui peut être mesurée à différents décalages vers le rouge.

Pourtant, la compréhension de la séquence de phénomènes ayant conduit à l'immense diversité des galaxies observées n'en est qu'à l'étape du défrichage. Les grands relevés effectués au tournant du siècle, après qu'ils soit apparu indispensable d'effectuer des analyses statistiques fiables fournissent des observations dans de grands volumes de l'Univers, que ce soit l'Univers proche (2dFGRS, SDSS, "Millennium"; Colless et al. 2003a; Adelman-McCarthy et al. 2008; Cross et al. 2004) ou à grande distance (DEEP2, VVDS; Davis et al. 2003, 2007; Garilli et al. 2008): ces données produisent de nombreux résultats prometteurs sur l'évolution des galaxies (Driver et al. 2005; Wake et al. 2006; Cimatti et al. 2006; Zucca et al. 2006; Franzetti et al. 2007; De Propris et al. 2007; Vergani et al. 2008; Cooper et al. 2008; Coil et al. 2008). La difficulté réside cependant dans la comparaison des observations de l'Univers lointain avec l'Univers local ou à faible décalage vers le rouge, ainsi que la mise en relation des différentes populations de galaxies détectées. Les limites sont liées au mode d'observation (spectroscopie à fente ou à fibre), à la qualité des images (différences d'échantillonnage et de réponse impulsionnelle), et aux indicateurs statistiques (décalages spectraux ou photométriques; types morphologiques, spectraux, ou spectro-photométriques).

Les simulations numériques à N-corps avec matière noire et gaz montrent qu'à l'intérieur des halos de matière noire (aux échelles de l'ordre du Mpc et en dessous), les effets de marée et de fusion façonnent les propriétés et les proportions des différents types de galaxies (Pomarède et al. 2009; Bournaud et al. 2011). Les observations et modélisations théoriques suggèrent que les effets d'accrétion et de rétroaction jouent par ailleurs un rôle important dans la régulation de la formation d'étoiles (Kaviraj et al. 2007; Ocvirk et al. 2008; Oppenheimer et al. 2010; voir aussi Silk 2011). Cependant, les simulations numériques existantes sont insuffisantes pour reproduire la diversité des galaxies observées dans des volumes cosmologiques (c'est-à-dire de l'ordre du gigaparsec), la résolution ne pouvant être accrue qu'au détriment du volume. Celle-ci est cependant nécessaire pour modéliser la formation d'étoiles lors des collisions de galaxies (Teyssier et al. 2010). Par ailleurs, si des modèles semi-analytiques prédisent avec succès les distributions de comptages, les détails du regroupement des galaxies de différentes masses et couleurs sont contredites par les observations (de la Torre et al. 2011).

Les galaxies observées se distinguent les unes des autres par leur masse, leur forme, leur dynamique, leur contenu spectral, et montrent des comportements collectifs en lien avec ces descripteurs. Les simulations numériques existantes montrent que ces descripteurs sont étroitement liés aux divers processus

en jeu dans la formation des galaxies (relaxation violente et dissipation, instabilité dynamique, formation d'étoiles, effets de marées), donnant ainsi accès à l'histoire des galaxies (Widrow et al. 2003; Debattista et al. 2004; Athanassoula 2005; Puech et al. 2010; Scannapieco et al. 2010; Bois et al. 2010; Guedes et al. 2011; Cappellari et al. 2011). Une mesure fiable de ces descripteurs est donc nécessaire si l'on souhaite comprendre la physique des galaxies, ainsi que la part des conditions initiales et celle des effets d'environnement. La masse et le contenu spectral des galaxies sont habituellement dérivés de la distribution en énergie spectrale des objets, par l'ajustement de spectres à la photométrie multi-bande. La dynamique est obtenue à partir des mesures de spectroscopie intégrale de champ (Puech et al. 2007). Quant à établir la forme des objets, cela nécessite des images bien résolues et des outils performants d'ajustement de profils. Les travaux cités indiquent que c'est pourtant un paramètre clé : les différentes histoires de formation des bulbes et des disques ainsi que des accrétions et fusions de galaxies conduisent à des objets distincts morphologiquement.

Aux limitations des observations et des simulations numériques s'ajoutent les problèmes de biais systématiques dans les mesures observationnelles. Ceux-ci peuvent être inhérents aux algorithmes de mesure, ou liés à certaines propriétés des objets. Dans la première catégorie se trouvent les problèmes de photométrie, qui sont récurrents dans l'histoire de l'astronomie. On mentionnera par exemple l'erreur d'échelle de magnitude du catalogue de plaques photographiques de l'hémisphère sud, obtenu par numérisation avec la machine APM ("Automatic Plate Measuring"), et les conséquences que cela pouvait avoir sur l'interprétation en terme d'évolution des galaxies (Maddox et al. 1990c; Bertin & Dennefeld 1997). Le "Sloan Digital Sky Survey" (SDSS) a résolu les problèmes d'uniformité de point-zéro et de vignettage, inhérents aux relevés couvrant le ciel par la juxtaposition de nombreuses plaques photographiques (de Lapparent et al. 1986b; Maddox et al. 1990b,a). Néanmoins, je montre ici que les détails de l'extraction de source, du calcul du fond de ciel et d'ajustement des profils peuvent conduire à des biais systématiques substantiels pour les galaxies proches du relevé SDSS, celles qui sont pourtant les mieux résolues et qui devraient servir d'étalon pour l'étude de l'Univers lointain.

Concernant les biais liés aux objets eux-mêmes, on mentionnera le fait que les galaxies se présentent avec des orientations différentes sur le ciel, ce qui conduit d'une part à des effets systématiques dans la photométrie des objets, avec un rougissement et une sous-estimation des flux pouvant atteindre 1 à 2 mag. (Driver et al. 2007), et à la possibilité de biais dans les estimations de masse stellaire (Graham & Worley 2008). La combinaison de l'orientation des galaxies sur le ciel avec les contraintes techniques des observations de spectroscopie (fentes alignées selon une même direction dans un champ de spectroscopie multi-objet; fibre optique centrée sur le bulbe des objets) peuvent conduire à des différences notables dans les propriétés spectrales des galaxies (voir par exemple Kewley et al. 2005). Dans ce mémoire, j'utilise les différents relevés auxquels j'ai participé pour évaluer ces divers biais et leur impact sur la caractérisation des différentes populations de galaxies.

Dans un premier temps, je décris le relevé ESO-Sculpteur, un programme-clé de l'ESO que j'ai mené à terme avec succès. Grâce à 70 nuits de temps d'observation sur le 3.5 m-NTT de La Silla, nous avons constitué des catalogues photométriques et spectroscopiques qui ont conduit à de nouvelles analyses concernant les fonctions de luminosité et le regroupement spatial des galaxies, ainsi qu'à un suivi infrarouge moyen. Ce programme a rendu possible l'accomplissement de trois thèses de doctorat.

Dans un deuxième temps, je décris le catalogue morphologique EFIGI, donc j'ai pris la co-responsabilité avec E. Bertin, qui a conduit également à une thèse de doctorat. Ce programme contient deux volets, une analyse visuelle par attributs morphologiques, et une analyse automatique de mesure des flux et des rayons d'échelle des galaxies, ainsi que de leurs composantes de bulbe et disque par ajustement de profils convolués. Je présente ici les mesures de flux, et je les utilise pour montrer les biais entre les types morphologiques et les types spectraux des galaxies, qui ne peuvent manquer d'affecter les relevés lointains. Dans la dernière partie je résume mes activités et mon expérience professionnelle, et je présente ma liste de publications.

J'utilise dans ce mémoire les paramètres cosmologiques suivants :

- $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ (Freedman et al. 2001)
- $\Omega_m = 0.3$ and $\Omega_\Lambda = 0.7$ (Dunkley et al. 2009)

Deuxième partie

LE RELEVÉ SPECTRAL ESO-SCULPTEUR

Chapitre 1

Acquisition des données

1.1 Collaborateurs

- Christèle Bellanger (alors doctorante IAP),
- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au TCFH, en détachement du Lab. d'Astrophysique de Marseille),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l'Univ. Pontificia Católica, Chili),
- Guy Mathez (LAOMP, Toulouse),
- Alain Mazure (actuellement au LAM, Marseille),
- Yannick Mellier (actuellement à l'IAP).

1.2 L'opportunité nouvelle des programme-clés

Le relevé ESO-Sculpteur a été rendu possible par la mise en place des “programmes-clé” en 1989, par Harry Van der Laan, alors récent directeur général de l'ESO. La mise en service imminente du NTT conduisait à un supplément de nuits d'observations. En répartissant ce temps supplémentaire sur les différents télescopes, pondéré en fonction de la taille des miroirs, on pouvait estimer que cela conduisait à 2000 nuits supplémentaires sur une période de 4 ans, dont la moitié sur le 3.6 m et le NTT. H. Van der Laan proposait d'utiliser ces nuits supplémentaires d'une nouvelle façon van der Laan (1988b).

L'analyse de la distribution des missions d'observations en fonction du nombre de nuits allouées montrait que la majorités des attributions et temps étaient de 2 à 3 nuits pour le 3.6 m et le 2.2 m, de 3 à 5 nuits pour les 2 télescopes de 1.5 m, et de 4 à 8 nuits pour le 1.4 m. Harry Van der Laan proposait d'offrir la possibilité d'une attribution garantie de 15 à 50 nuits de télescopes sur une période de 1 à 4 ans pour des programmes scientifiques pour lesquels un échantillon statistique nécessitant un grand nombre de nuits de télescope était indispensable van der Laan (1988b). Ces programmes ne devaient pas être la simple accumulation d'un grand catalogue, mais devaient répondre à une question-clé de l'astrophysique avec des objectifs spécifiques et une stratégie bien structurée.

Après un appel d'intention au printemps 1988, 60 réponses parvinrent pour un temps total d'observation estimé de ~ 1850 nuits sur le 3.6 m et le NTT, et 1550 nuits sur le 2.2 m les 2.5 m et les 1.4 m, soit 3400 nuits au total (van der Laan 1988a). L'appel à proposition fut lancé avec une attribution de 125 nuits sur les 3.6 m et le NTT pour la première année (1989), et un objectif de 240 nuits par an sur ces mêmes télescopes pour les années suivantes (van der Laan 1989).

Le système des “programme-clés”, innové par Van der Laan sur les télescopes de l'ESO, inspira ensuite d'autres observatoires et a conduit aux “Key-Projects” avec le Télescope Spatial de Hubble, et aux “Large Programmes” à l'ESO et au Télescope Canada-France-Hawaii (TCFH). L'avènement d'instruments de plus en plus performants pour effectuer des relevés extra-galactiques comme MEGACAM au TCFH,

et VIMOS au VLT, permet aussi la mise en place de programmes de type “Legacy”. Ces programmes sont des grands relevés effectués par des équipes compétentes pour mener à bien les observations et le traitement des données de haute qualité, les données traitées étant ensuite mises à la disposition de toute la communauté.

1.3 Motivations et contexte scientifique

Le système des programme-clés était indispensable à la réalisation de relevés de galaxies, pour lesquels un grand volume de l’Univers doit être sondé afin qu’il soit représentatif de la distribution et permette des analyses quantitatives fiables. Des groupes de chercheurs américains avaient pu effectuer de tels relevés grâce à des télescopes appartenant à leur laboratoire ou à un groupe de laboratoires. C’est dans ce cadre qu’avait été effectué l’acquisition du relevé du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) : un relevé complet de galaxies avec décalage spectral et magnitude B limite de 14.5 (Huchra et al. 1983), utilisant le télescope de 1.5 m du “Fred Lawrence Whipple Observatory” appartenant au CfA, et situé à Mount Hopkins dans l’Arizona.

En attribuant la moitié du temps de ce télescope, c’est-à-dire toutes les nuits sombres, le relevé spectroscopique du CfA a pu être étendu jusqu’à la magnitude B limite de 15.5. Ces cartes eurent un impact important, car elles révélèrent pour la première fois la structure cellulaire de la distribution des galaxies (de Lapparent et al. 1986a). Elle ont aussi participé à faire évoluer la façon de concevoir l’attribution du temps de télescope, par la prise de conscience que la communauté devait non seulement investir une large fraction de son temps de télescope sur des projets de relevés systématiques, mais aussi dédier des petits télescopes pour de tels projets. Le relevé SDSS fut conçu dans cet esprit.

La découverte de la structure cellulaire de la distribution des galaxies à grand échelle (de Lapparent et al. 1986a), et l’existence d’un “mur” de galaxies sur environ 200 Mpc (Geller & Huchra 1989) conduisait naturellement à se poser la question de la taille maximale des vides et feuillets détecté, celle-ci étant forcément limitée afin d’être compatible avec l’isotropie du rayonnement cosmologique à 2.7 deg. K (Bennett et al. 1996). Il était de surcroît naturel de se demander si l’alternance de vides et feuillets se prolongeait à plus grand décalage spectral.

L’autre motivation du programme était d’examiner les effets d’évolution des galaxies individuelles sur l’intervalle de décalage vers le rouge 0.1 – 0.5. Au vu des résultats récents montrant l’excès de galaxies bleues dans les comptages profonds Tyson (1988), et l’excès de galaxies bleues dans les amas de galaxies à $z \simeq 0.3$, il était légitime de s’interroger sur la nature des galaxies causant ce bleuissement, et sur leur répartition spatiale.

1.4 Observations

Compte-tenu des objectifs scientifiques et des performances instrumentales du moment, il me sembla opportun d’obtenir la photométrie et la spectroscopie d’environ un millier de galaxies de champ jusqu’à un décalage spectral de 0.5 et une magnitude limite équivalente à $B \simeq 22$. L’acquisition du relevé photométrique par *imagerie CCD*, et un suivi spectroscopique *complet* furent posés comme critères incontournables du projet.

1.4.1 Choix du champ sur le ciel

Afin de minimiser l’extinction galactique, le champ fut choisi à proximité du pôle sud galactique (dans la constellation du Sculpteur), ce qui impliquait une déclinaison voisine de la latitude de l’observatoire de La Silla, et présentait donc l’avantage d’observer avec une masse d’air inférieure à 1.4.

Afin d’échantillonner largement la distribution des galaxies, il fallait choisir un champ dans lequel il n’y avait pas d’amas riche de galaxies, et qui aurait conduit à consacrer une grande partie du temps d’observation sur ce système, au détriment de l’exploration des grandes structures. Les amas d’avant-plan

pouvaient être évités a priori grâce au catalogue d’Abell (1958), et plusieurs régions proches du pôle sud galactique et dénuées de tout amas d’Abell étaient envisageables. J’ai examiné ces régions à l’oeil à partir des plaques photographiques de Schmidt (ESO), dont des copies sur papier étaient disponibles à l’IAP. Certaines contenaient des amas riches d’arrière plan (à un décalage spectral de $0.3 - 0.5$), pour lesquels le catalogue d’Abell est largement incomplet : ceux-ci sont visibles à l’oeil sous la forme d’une sur-densité de galaxies à la limite de la plaque photographique.

La région que j’ai choisie est dénuée d’amas proches d’avant et d’arrière-plan, tout en montrant un grand nombre de galaxies faibles apparemment “de champ”. Les coordonnées de la région choisie sont indiquées dans la Table 1.4.1 1, ainsi que la latitude galactique et l’étendue angulaire du relevé.

TAB. 1.1 – *Localisation du relevé ESO-Sculpteur*

R.A., DEC.	b^{II}	Aire couverte en Photométrie	Aire couverte en Spectroscopie
centre	[deg]	[deg ²]	[deg ²]
$0^{\text{h}}22^{\text{m}}30^{\text{s}}, -30^{\circ}06'$	-83	$0.24 \times 1.53 = 0.37$	$0.24 \times 1.03 = 0.26$

1.4.2 Choix d’un relevé digital

À l’époque à laquelle le programme a démarré, il n’existait pas de relevé profond CCD du ciel, et le seul relevé du ciel austral était le catalogue de Maddox et al. (1990b), obtenu à partir des plaques photographiques du télescope UK Schmidt, numérisées par la machine APM (“Automated Plate Measurement”) jusqu’à une magnitude limite $B_J \simeq 22$.

Au cours de ma thèse, j’avais mis en évidence les variations de point-zéro et les effets de vignettage (obscurcissement des objets à la périphérie des plaques) qui affectaient le catalogue de Shane et Wirtanen (Geller et al. 1984). Nous avons ensuite évalué les biais qui en résultaient sur les mesures du regroupement spatial (de Lapparent et al. 1986b), et remettaient en cause les modélisations de Groth & Peebles (1977). Il fut montré que des effets analogues entâchaient le catalogue de l’APM (Maddox et al. 1990a; Bertin & Dennefeld 1997), biaisant les modélisations de Maddox et al. (1990c).

Au vu de ces problèmes d’hétérogénéité des catalogues basés sur les plaques photographiques, il nous a semblé judicieux de ne pas utiliser le catalogue APM, et d’acquérir la photométrie du relevé ESO-Sculpteur par imagerie CCD, afin de bénéficier non seulement d’une meilleure homogénéité, mais aussi d’une garantie de sensibilité et de linéarité.

1.4.3 Choix des instruments d’observation

L’instrument EFOSC (“ESO Faint Object Spectrograph and Camera”) qui venait d’être installé sur le télescope de 3m60 de l’ESO offrait l’opportunité nouvelle de coupler l’acquisition de la photométrie et de la spectroscopie sur le même télescope (Buzzoni et al. 1984). Après 3 nuits d’observations sur le télescope de 3.60 m à La Silla en août 1987, avec mes collaborateurs Yanick Mellier, Guy Mathez, et Alain Mazure, nous avons prouvé la faisabilité du projet. Cela a conduit à l’attribution de 3 nuits supplémentaire en août 1988.

Au cours de ces deux missions nous avons obtenu les images dans la bande R d’une région du ciel de 172 minutes-d’arc-carrés. Durant la même mission, au cours de l’après-midi, nous sélectionnions à l’oeil les galaxies avec une magnitude plus brillante que 20.5 en R. Puis nous utilisions le nouvel instrument PUMA2 (“Punching Machine”), la copie de la machine conçue par le groupe de Toulouse et installée au Télescope Canada-France-Hawaï, permettant de percer des trous et fentes sur des plaques métalliques afin d’effectuer la spectroscopie simultanée de plusieurs galaxies d’un champ donné (Fort et al. 1986). Nous pouvions effectuer les observations spectroscopiques dès la nuit suivante, et obtenir en 2 fois 1h30 les spectres de galaxies à $R \simeq 20.5$ avec un rapport signal-sur-bruit de 10 dans le continu, pour environ 10 galaxies dans un champs de 5x3 minutes d’arc-carré.

L'avènement des programme-clés (voir Sect. 1.2) nous a conduit à réviser la stratégie et l'ampleur de notre programme, et à proposer un programme-clé, qui fut accepté en février 1989 (de Lapparent et al. 1989a). Ces programmes étant particulièrement nouveaux, H. Van der Laan appelait personnellement les P.I. des projets pour leur annoncer l'acceptation de leur proposition. Nous avons ainsi obtenu une attribution garantie de 60 nuits sur les 65 demandées sur les télescopes de 3.6 m et le NTT (de Lapparent et al. 1989b).

En octobre 1990, lors de l'installation d'EMMI ("ESO multi-mode instrument"; D'Odorico 1990) sur le tout nouveau NTT ("New Technology Telescope"), ayant un miroir de 3.50 m de diamètre ajusté par optique active (Tarenghi & Wilson 1989), les champs du relevé ESO-Sculpteur ont été utilisés pour effectuer un test de faisabilité technique de spectroscopie multi-objet (Dekker et al. 1991). Les spectres obtenus furent d'excellente qualité compte-tenu de la faible brillance de surface de certaines des galaxies observées. EMMI sur le NTT était ainsi parfaitement adapté à réalisation du programme ESO-Sculpteur, par sa meilleure qualité d'image, sa sensibilité accrue et sa plus grande couverture de champ en imagerie et spectroscopie par rapport à EFOSC. Le comité d'attribution du temps de télescope, a alors accepté de transférer notre programme sur le NTT à partir d'Octobre 1991, ce qui a permis d'accélérer d'au moins un facteur 2 le rythme d'obtention des données, et garantissant dans le temps d'observation total imparti, de pouvoir atteindre la couverture du ciel initialement visée (de Lapparent et al. 1993).

1.4.4 Stratégie d'observation

Afin de couvrir les 0.24×1.53 degré-carré sur ciel par des images CCD dont les plus grandes mesurait 9 minute d'arc de côté (CCD Loral sur EMMI au NTT; Arnouts et al. 1997), il fallait paver le champ avec une mosaïque d'images. Au total, 27 à 30 champs furent obtenus en *B*, *V*, *R* avec EFOSC, et 21 à 25 champs en *B*, *V*, *R* avec EMMI. Sauf sur les bord du relevé, chaque image CCD fut obtenue par un décalage de coordonnées de 90% de la taille du CCD en ascension droite et en déclinaison, ce qui assurait des zones communes nombreuses entre les images adjacentes, qui furent ensuite utilisées pour améliorer l'homogénéité de la photométrie.

Afin d'éviter la saturation des étoiles brillantes de certains champs, les poses de chaque images furent morcelées en 2 ou 3 poses, selon la sensibilité des instruments et filtres utilisés. Les temps d'observations pour les poses photométriques étaient de 30, 25 et 20 minutes en *B*, *V*, et *R* resp. avec EFOSC, et de 25, 20 et 15 minutes en *B*, *V*, et *R* resp. avec EMMI, grâce à une sensibilité accrue. Les limites de complétudes atteintes sont 24.5, 24.0 et 23.5 en *B*, *V*, et *R*.

L'intervalle de seeing pour les observations d'imagerie effectuées avec EFOSC au 3.60 m est de 1.1–1.65 seconde d'arc. Le 3.60m a longtemps posé des problèmes de seeing médiocres, qui n'ont été résolus qu'ultérieurement (Faucherre 1995; Guisard 1996; Guisard et al. 1997). La taille des pixels sur EFOSC était à l'époque de $0.675''$, ce qui impliquait un sous-échantillonnage des images. Les meilleur seeing obtenu au NTT avec EMMI (valeur moyenne de $1.0''$), et les plus petits pixels de détecteurs (de $0.27''$ à $0.44''$, voir Table 2, Arnouts et al. 1997) ont conduit à un meilleur échantillonnage de la réponse impulsionnelle.

Les galaxies à observer en spectroscopie étaient sélectionnées préalablement à la mission, à partir des observations précédentes. Celle-ci permettaient d'effectuer la photométrie des galaxies détectées et de sélectionner celles qui étaient suffisamment brillantes pour appartenir à l'échantillon spectroscopique.

L'intérêt d'effectuer les relevés photométriques et spectroscopiques avec les mêmes instruments EFOSC et EMMI, était celui d'une grande souplesse, permettant une optimisation de l'utilisation du temps d'observation. Lorsque les nuits étaient de qualité photométrique, la priorité était donnée aux observations photométriques. Puis l'on passait à des observations spectroscopiques lorsque les nuits (ou les parties de nuit) n'étaient plus photométriques.

Le lourd travail de préparation des masques pendant tout l'après-midi précédent chaque nuit rendait les missions d'observation particulièrement fatigantes, et nécessitait 2 personnes par mission. Je fus présente à chaque mission, secondée dans les premiers temps par alternativement, A. Mazure, Y. Mellier, et G. Mathez. A partir de 1992, les 3 doctorants formés à l'IAP m'accompagnèrent à tour de rôle à chaque mission.

1.4.5 Choix des filtres et des magnitudes limites des catalogues

Le choix d’observer tous les champs du relevé dans les bandes B , V et R_c du système Johnson/Cousins repose sur le souhait d’avoir pour chaque galaxie 2 couleurs couvrant une large partie du domaine visible par des filtres adjacents. En l’occurrence, les filtres choisis couvrent l’intervalle 4000-8000Å, correspondant au domaine de longueur d’onde observé en spectroscopie. On verra plus loin que cela permet d’affiner la calibration en flux des spectres.

Le choix de la bande R_c pour la sélection des galaxies à observer en spectroscopie fut le résultat de 3 constatations : les relevés de galaxies existants (APM, CfA etc.) avaient été sélectionnés dans la bande B à partir de plaques photographiques, et la bande B se décale dans la bande R à un décalage vers le rouge de 0.6 ; les galaxies spirales sont en moyenne 1.5 magnitude plus brillantes dans la bande R que dans la bande B ; les CCD ont un bien meilleur rendement quantique dans la bande R que dans la bande B . Le choix de la bande R permettait ainsi d’effectuer l’imagerie préalable à la spectroscopie en un temps d’observation plus court qu’avec la bande B , cette dernière pouvant être obtenue pendant les missions ultérieures.

Le choix de la magnitude limite pour le catalogue spectroscopique $R_c = 20.5$ fut essentiellement déterminé par le temps de pose maximum qui pouvait être envisagé pour un relevé spectroscopique profond de galaxies faisable en environ 50 nuits de 3.6 m et NTT : 3h par champ de spectroscopie multi-objet, produisant les spectres simultanés d’environ 30 galaxies par champ. Cela permettait de viser l’acquisition d’un catalogue virtuellement complet d’environ 700 décalages spectraux. De surcroît, cette magnitude limite assurait la détection des galaxies spirales avec une magnitude absolue de $M^* \simeq -20$ au pic de la fonction de sélection du catalogue ($z \sim 0.3$). La magnitude $R_c = 20.5$ représentait par ailleurs un bon compromis entre l’efficacité d’EFOSSC et d’EMMI pour obtenir la spectroscopie d’un échantillon de plusieurs centaines de galaxies, et la nécessité d’une couverture angulaire suffisante pour échantillonner chaque feuillet de galaxies intercepté par la ligne de visée. On peut remarquer qu’incidemment, la limite $R_c = 20.5$ correspondait à la magnitude limite $B \simeq 22$ des catalogues basé sur les plaques photographiques comme l’APM.

1.4.6 Répartition temporelle et déroulement des observations

L’allocation initiale de temps d’observation fut de 60 nuits de 3.6 m et de NTT réparties en 2 missions par an (septembre et octobre) pendant 6 ans (1989-1994). Le contexte logistique des programmes-clé était très souple : à la fin de chaque année d’observation (tous les 2 semestres), on transmettait le nombre de nuits souhaité pour la prochaine année, en joignant un rapport sur les observations de l’année écoulée, et sur le traitement de ces données. La garantie de temps d’observation pendant chaque semestre s’est vérifiée être sans faille. Sur les 60 nuits, il y eut 12 nuits de mauvais temps, qui furent compensées par une attribution supplémentaire de 11 nuits en 1995.

Les premières missions du programme furent consacrées aux observations d’imagerie pendant chaque nuit photométrique. Pendant les nuits non photométriques, les observations de spectroscopie multi-objet furent effectuées. Celles-ci étaient préparées dans un premier temps à l’IAP par le traitement des images de la mission précédente, et la sélection des galaxies plus brillantes que la magnitude limite visée de $R_c = 20.5$. La fabrication des masques pour les observations de spectroscopie multi-fente se faisait pendant la mission, en prenant une image du champ à observer pendant la première nuit, à partir de laquelle les fentes pouvaient être positionnées avec précision sur les galaxies qui avaient été sélectionnées lors du traitement des images. L’image de préparation du champ devait être positionnée et orientée de manière à pouvoir observer le plus grand nombre de galaxies par champ tout en maintenant des largeurs de fentes suffisantes pour échantillonner suffisamment le fond de ciel de part et d’autre des galaxies, et ainsi effectuer des soustractions de ciel de qualité. Aucun logiciel n’existait à cette époque pour effectuer cette préparation des masques, et l’optimisation fut effectuée visuellement. Les fentes percées pour le relevé mesuraient 1.3-1.8 secondes d’arc de largeur et 10-15 minutes d’arc de longueur.

L’excellente complétude spectroscopique atteinte avec une couverture spatiale homogène (92% à $R_c \leq 20.5$) atteste du succès de la méthode. À noter que nous prenions en compte les galaxies déjà observées lors des missions précédentes, et ajoutions des galaxies avec $R_c > 20.5$ lorsqu’il restait de la place pour quelque

fentes supplémentaires sur un masque (souvent le cas pendant les dernières missions du programme). Cela permet d'obtenir la spectroscopie de 176, 77 et 18 galaxies supplémentaires avec dans les intervalles de magnitude $20.5 - 21$, $21 - 21.5$, et $21.5 - 22$ resp., conduisant à une complétude spectroscopique de 75% à $R_c \leq 21$ (voir Table 1, de l'article choisi n° 4, p. 109, de Lapparent et al. 2003).

Chapitre 2

Traitements et catalogues

Le programme-clé ESO-Sculpteur étant en quelque sorte “pionnier” par la combinaison d’image-rie CCD et de spectroscopie multi-fente, aucun logiciel n’existait à l’époque pour effectuer les traitements systématiques des images et spectres multi-objets. Emmanuel Bertin commença à cette époque à développer son logiciel “SExtractor” pour l’extraction de sources d’images astronomiques, dont le relevé ESO-Sculpteur a bénéficié comme banc d’essai.

Les autres outils performants d’AstrOmatic (<http://www.astromatic.net>; E. Bertin) destinés à la calibration astrométrique et l’homogénéisation photométrique, le compositage et la co-addition d’images, la mesure de la réponse impulsionnelle, virent le jour plus tard. Un logiciel complet pour le traitement des données de spectroscopie multi-objet fut également développé en vue de traiter les données de l’instrument VIMOS au VLT (“VIMOS Interactive Pipeline Graphical Interface”, ou VIPGI Scodeggio et al. 2005).

Par conséquent, le traitement de nos données photométriques et spectroscopiques du programme ESO-Sculpteur a nécessité l’écriture de nombreuses procédures automatiques dans le langage MIDAS, le logiciel de traitement des données d’observations développé par l’ESO, pour un total de 50 000 lignes de commandes (dont les 3/5 pour la spectroscopie multi-objet).

2.1 Collaborateurs

- Christèle Bellanger (alors doctorante IAP),
- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au TCFH, en détachement du LAM, Marseille),
- Sandro Bardelli (Obs. de Bologne, Italie),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l’Univ. Pontificia Católica, Chili),

Le traitement des données fut un lourd travail. Sur les conseils répétés de Harry Van der Laan, j’engageai la supervision de 3 doctorants à l’IAP, en 1992 (C. Bellanger), 1993 (S. Arnouts), et 1994 (G. Galaz). Ce renfort fut précieux et efficace. Les doctorant participèrent à la fois aux longues missions d’observation, et au traitement des images et spectres. S. Bardelli apporta une aide importante dans la phase la plus longue, celle de la mesure des décalage spectraux, au moyen des logiciels que nous avions mis au point à l’IAP. Nous avons aussi bénéficié d’une aide technique pendant une année (Christian Oberto, pour le traitement de la spectroscopie).

Si les observations furent terminées en 1995, le traitement de l’ensemble des observations spectroscopiques et des mesures de décalage vers le rouge, ainsi que la constitution des catalogues furent terminés en 1998, soit 9 ans après le début des observations.

2.2 Catalogue photométrique

Article: “The ESO-Sculptor faint galaxy redshift survey: The photometric sample”, Arnouts, S., **de Lapparent**, V., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., Bertin, E., Kruszewski, A., 1997, *A&A Suppl.* 124, pp. 163-182.

Thèse: “Etude photométrique multi-couleur d’un catalogue de galaxies lointaines”, Arnouts, S., 1996, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 7.

Le traitement des images CCD et la constitution d’un catalogue photométrique homogène ont fait l’objet d’une thèse d’Astrophysique à l’IAP par Stéphane Arnouts. Les différentes étapes des procédures de traitement des images écrites spécifiquement pour le programme dans l’environnement MIDAS par S. Arnouts et moi-même furent : (1) la soustraction du biais; (2) l’aplatissement des images au moyen d’un “super-flat” obtenu par filtre médian sur plusieurs images des champs; (3) la soustraction des sauts de flux causés par les rayons cosmiques; (4) la calibration photométrique au moyen de séquences stellaires obtenues en début, fin et milieu de nuit de photométrie; (5) la mesure des coordonnées astronomiques des objets.

La calibration photométrique visait à obtenir d’un part les coefficients de couleur, donnant le rapport entre les couleurs d’une séquence d’étoiles observées à travers le dispositif expérimental (téléscope, instrument, détecteur) complété par le filtre d’observation, et les couleurs de ces étoiles dans le filtre de référence que le filtre d’observation vise à approcher. La calibration photométrique fournit en outre le “point-zéro” du dispositif observationnel dans chaque filtre d’observation. La connaissance des coefficients de couleurs et des points zéro pour chaque filtre d’observation permet de transformer les flux mesurés des objets en magnitudes apparentes dans les filtres de référence.

Les coordonnées astronomiques des objets furent obtenues par alignement des images CCD sur les images provenant de la numérisation à la MAMA (Observatoire de Paris) du cliché photographique contenant la région du champ ESO-Sculpteur. Cet alignement produit les transformations MAMA-CCD, qui jointes aux transformations MAMA-J2000 fournies par le centre de numérisation, donna les transformation CCD-J2000. Ces procédures mises au point dans l’environnement MIDAS fournirent des coordonnées absolues avec une précision ≤ 0.5 arcsec.

Les observations de photométrie et de spectroscopie furent effectuées avec 2 instruments différents, EFOSC et EMMI, et pour ce dernier, 4 CCD différents furent utilisés (3 pour la voie rouge, et 1 pour la voie bleue), avec des tailles et échantillonnages différents. Les différents paramètres des CCD, et les point-zéro moyens dans les différentes bandes sont indiqués dans la Table 2 de Arnouts et al. 1997). Il était donc important de réajuster les point-zéros de chaque image CCD de la mosaïque. Ceci fut effectué par une méthode itérative visant à minimiser les différences de magnitudes dans les régions de recouvrement des 50 images (voir Arnouts et al. 1997, pour les détails). Ce réajustement fut fait de façon séparée pour les images du NTT et du 3.6m, afin de ne pas introduire un gradient entre les deux régions du ciel, pour lesquels des décalages systématiques des point-zéros avait été détectés dans les bandes *V* et *R*. Le réajustement fut de surcroît contraint par des observations supplémentaires de 4 à 5 champs dans chaque filtre, observés au NTT dans de très bonnes conditions de seeing ($0.8 - 1.0''$) et de photométrie lors d’une même nuit d’observation, et répartis tout le long de la bande du ciel que constitue le relevé. Ces champs furent utilisés comme référence absolue de la photométrie. Le processus d’ajustement des recouvrements permit de réduire l’écart-type entre les magnitudes d’objets communs dans les recouvrements de 0.11 mag en *B*, 0.13 mag en *V*, et 0.14 mag en *R* à 0.04 mag dans les 3 bandes.

La détection des objets, le calcul de leur magnitudes ainsi que la séparation étoiles-galaxies ont été effectués avec le logiciel d’analyse d’image SExtractor (Bertin & Arnouts 1996). Les magnitudes “MAG_BEST” ont été utilisées, une combinaison entre les magnitude d’ouverture et les magnitudes isophotales. Les données du programme ESO-Sculpteur ont contribué de façon significative à la mise à l’épreuve et à l’amélioration des performances de SExtractor pour la photométrie CCD de galaxies faibles, par une étroite collaboration entre Stéphane Arnouts et Emmanuel Bertin. Ce logiciel est maintenant largement utilisé par la communauté astronomique.

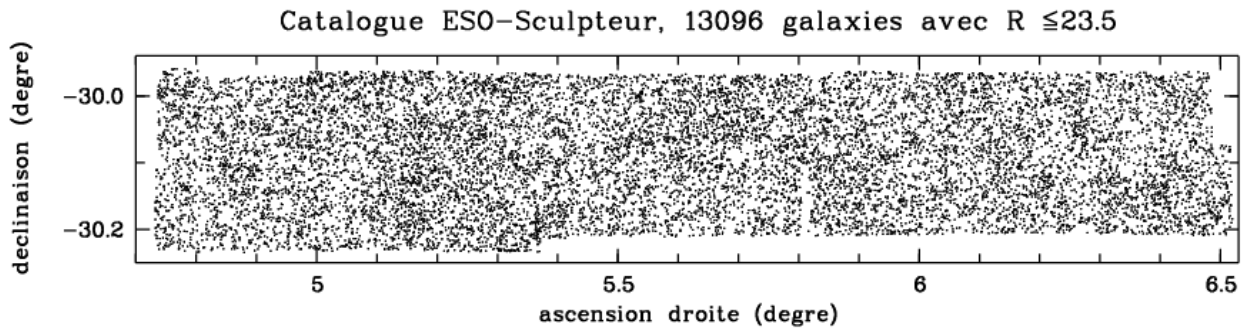


FIG. 2.1 – La répartition sur le ciel des galaxies du relevé ESO-Sculpteur, dans une région de 0.37 deg^2 du ciel austral [Arnouts et al. 1997].

Le catalogue ainsi obtenu est complet jusqu'à $R_c \simeq 23.5$, $V_j \simeq 24$ et $B_j \simeq 24.5$ dans une région de 0.37 deg^2 du ciel à proximité du pôle sud Galactique. Il fournit pour plus des $\sim 10\,000$ galaxies les magnitudes totales dans ces 3 filtres du système Johnson/Cousins et les coordonnées équatoriales (J2000) avec une précision de $0.2''$. La distribution des objets est montrée dans la Fig. 2.1. Les données photométriques produisent des distributions de comptages et de couleurs qui sont en bon accord avec les diverses données existantes (Arnouts 1996; Arnouts et al. 1997), et confirmèrent le “bleuissement” des galaxies à $R > 21$, visible également dans les distributions de couleur $B - V$ des galaxies à faible magnitude.

2.3 Catalogue spectroscopique

Article: “The ESO-Sculptor faint galaxy redshift survey: the spectroscopic sample”, Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., 1995, *A&A* 110, pp. 159-171

Thèse: “Un nouveau catalogue pour cartographier les grandes structures à $z \sim 0.5$ ”, Bellanger, C., 1995, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 6.

Le traitement des données de spectroscopie et de la mesure des décalage spectraux fit l'objet d'une thèse d'Astrophysique à l'IAP par Christhèle Bellanger. Avec son aide concernant la corrélation-croisée des spectres, je développai pendant de long mois dans l'environnement MIDAS des procédures semi-automatiques permettant le dépouillement de la spectroscopie multi-objet, qui permirent de traiter toutes les données de façon optimisée et homogène. Les spectres des galaxies les plus faibles ne représentant que quelques pourcents du fond de ciel, il était crucial d'optimiser chaque étape du traitement des spectres. Ces procédures ne requièrent que quelques rares interventions humaines, comme celle de la sélection des extrémités des fentes (cette approche est plus fiable que toute méthode automatique, et serait lourde à programmer pour prendre en compte tous les cas réels possibles, dont par exemple le recouvrement de fentes voisines sur quelques pixels).

La réduction des données des images de spectroscopie multi-objet est basée sur les étapes automatiques suivantes (sauf si indiqué autrement) :

- Le nettoyage des sauts de flux causés par les rayons cosmiques, qui peuvent mimer des raies d'émission s'il sont sur le spectre d'un objet; pour cela les poses sont toujours doublées (1h30 par pose), et le nettoyage se fait dans la majeure partie des cas de façon automatique par comparaison des deux poses.
- La correction de la variation de transmission des fentes, qui sont percées par une succession de trous pour EFOSC, et de mini-fentes pour EMMI; cette correction se fait par éclaircissement du masque par une lampe de spectre proche du ciel, et permet de réduire les variations de transmission de 4% à 1% avec EFOSC, et de 2.5% à 0.3% avec EMMI.

- L’extraction des fentes individuelles par intervention visuelle sur le profil moyen des spectres 2D le long des fentes.
- La calibration en longueur d’onde effectuée dans l’espace à 2 dimensions que constitue chaque fente individuelle.
- La soustraction du ciel par un ajustement à 2 dimensions prenant en compte les variations d’intensité du spectre du ciel le long de la fente en fonction de la longueur d’onde. La plage de ciel est choisie visuellement, afin d’éviter les biais par les voisins et les bords des fentes (le choix visuel est ici aussi la méthode la plus fiable).
- L’extraction des colonnes de spectre dans chaque objet pondérée par le profil de l’objet à travers chaque fente, afin de donner moins de poids aux spectres des ailes de l’objet qui souffrent d’un moins bon rapport signal-sur-bruit.

L’ensemble de cette procédure permet d’extraire facilement les spectres des ~ 10 galaxies par champ d’EFOSC, et ~ 30 par champ d’EMMI. Leur dispersion est de 230 \AA/mm , leur résolution varie de 20 \AA (EFOSC1) à 10 \AA (EMMI), et ils couvrent $4300\text{--}7000 \text{ \AA}$ avec EFOSC1 et $3500\text{--}9000 \text{ \AA}$ avec EMMI. Environ 100 spectres furent obtenus avec EFOSC1 au 3.6m, les 800 autres furent obtenus avec EMMI au NTT.

Pour chaque galaxie, l’intervalle de longueur d’onde dans le référentiel de la galaxie dépend de la combinaison de la dispersion du grisme, de la position de l’objet dans le masque multi-fente, et du décalage spectral de l’objet. La majorité des spectres EFOSC ont un intervalle dans le référentiel de la galaxie de $3300\text{--}4700 \text{ \AA}$ pour les spectres EMMI il est de $3300\text{--}5700 \text{ \AA}$. Par conséquent, peu de spectres incluent la raie d’émission $H\alpha$, à 6563 \AA , qui est utile pour déterminer l’extinction du spectre par le rapport avec la raie $H\beta$. En revanche, les raies H (3968.5 \AA) et K (3933.7 \AA) du Ca II et la bande G de la molécule CH (4304.4 \AA) sont détectées dans la plupart des spectres.

Le spectre de chaque galaxie est ensuite obtenu par soustraction du spectre du ciel correspondant, et par somme des 2 poses pondérée par le rapport signal-sur-bruit de chacun des 2 spectres. Les spectres résultants ont un rapport signal-sur-bruit moyen dans leur continu variant entre 10 et 50 pour les galaxies à $R_c \leq 20.5$, et entre 5 et 15 aux magnitudes plus faibles.

Les décalages spectraux sont mesurés d’une part par corrélation croisée avec un spectre du bulbe de M31, qui fournit un “point-zéro” précis et fiable pour l’échelle des décalages spectraux, ainsi qu’avec 6 spectres de référence décrivant les différents types spectraux E, S0, Sa, Sb, Sc, Irr (voir Bellanger et al. 1995 pour les détails). Ces corrélation croisées fournissent un signal basé sur les raies d’absorption.

Les raies d’émission sont d’autre part ajustées par des gaussiennes et produisent une autre mesure, le décalage spectral d’émission. Une fraction importante des galaxies (48%) présente des raies d’émission (Galaz & de Lapparent 1998), principalement [OII] 3727 \AA , $H\beta$ 4851 \AA , [OIII] 4958.9 \AA , et 5006 \AA , dont les largeurs équivalente sont mesurées après calibration en flux des spectres (voir Sect. 2.4).

Ces diverses mesures et leurs incertitudes sont comparées, et lorsqu’elles sont cohérentes, sont combinées et pondérées afin d’en déduire le décalage spectral final de chaque objet. Des tests extensifs de comparaison interne des mesures spectroscopiques multiples, ont fourni une évaluation détaillée de la qualité des données du relevé ESO-Sculpteur (de Lapparent et al. 2003). La précision des décalages spectraux est $\sigma_z = 0.00055$, soit 165 km/s ou 2.35 Mpc . Il est à noter que tous les spectres sont examinés visuellement au cours de toute la chaîne de traitement, et un indice de confiance inférieur à 100% est attribué lorsque qu’un ou plusieurs critères remettent en doute la fiabilité du décalage spectral.

La dernière étape fut celle de l’identification croisée du catalogue photométrique avec les galaxies observées en spectroscopie, pour lesquelles le logiciel utilisé au télescope ne fournissait pas de coordonnées. Ceci fut fait par repérage visuel des galaxies au sein des images correspondantes du relevé photométrique, à partir des cartes de champs imprimées au télescope lors de la fabrication des masques, produisant des listes de coordonnées $[x,y]$ approximatives. Celles-ci furent ensuite converties en coordonnées astronomiques et croisées avec le catalogue photométrique.

Le catalogue ainsi obtenu fournit les spectres et décalages spectraux de ~ 900 galaxies avec $R_c \leq 21.8$ (et $0.1 \leq z \leq 0.6$) dans 0.25 deg^2 du ciel. Les 613 galaxies à $R_c \leq 20.5$ constituent un catalogue spectroscopique complet à 92%. L’échantillon de 270 galaxies supplémentaires avec mesure de décalage spectral dans l’intervalle de magnitude $20.5 < R_c \leq 21.8$ conduit à une complétude spectroscopique de

14%, mais celle-ci augmente à 46% pour les 176 galaxies avec $R_c \leq 21$, soit une complétude cumulée de 76% à $R_c \leq 21$, et 52% à $R_c \leq 21.5$.

2.4 Calibration en flux, classification spectrale, et corrections-k

Article: “The ESO-Sculptor Survey: spectral classification of galaxies with $z \leq 0.5$ ”, Galaz, G., de Lapparent, V., 1998, *A&A* 332, pp. 459-478.

Thèse: “Classification spectrale et fonctions de luminosité des galaxies lointaines”, Galaz, G., 1997, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 7.

La calibration en flux des spectres fut effectuée dans le cadre d’une troisième thèse à l’IAP, par Gaspar Galaz, un étudiant Chilien qui venait d’effectuer le DEA d’Astrophysique de Techniques Spatiales de l’Observatoire de Meudon.

Cette calibration basée sur l’observation en début, milieu et fin de nuit, de standards spectro-photométriques positionnés sur une grille pavant la région du champ disponible pour la spectroscopie. Les 2/3 des spectres ESO-Sculpteur furent obtenus dans des conditions météorologiques de qualité spectro-photométrique. Pour chaque spectre, nous avons ensuite mesuré les largeurs équivalentes des raies d’émission et d’absorption, qui fournissent des indicateurs complémentaires à la classification spectrale.

Nous avons effectué un test de la qualité de la calibration en flux en comparant les couleurs photométriques avec les couleurs “spectroscopiques”. Ces dernières sont obtenues en convoluant les spectres ESO-Sculpteur par les filtres standard B , V , et R_c , après calibration par des étoiles standards pour lesquelles photométrie et spectro-photométrie sont disponibles (Hamuy et al. 1992, 1994; Landolt 1992). Les couleurs “spectroscopiques” $V - R_c$ et $M_B - M_V$ sont calculées à partir des spectres présentant l’intervalle spectral correspondant. La comparaison avec les couleurs photométrique indique que les spectres ESO-Sculpteur ont un continuum trop rouge de 9% tous les 1000 Å dans l’intervalle $\sim 4000 - 8000$ Å. Nous interprétons ce résultat comme une sous-évaluation de la calibration spectro-photométrique dans la partie bleue des spectres, qui est affectée par une faible sensibilité des détecteurs. Une autre cause possible est la réfraction atmosphérique différentielle qui a tendance à séparer la partie bleue de la partie rouge des spectres. Les fentes étant alignées sur les images en R_c , la spectroscopie aura tendance à perdre la partie bleue des spectres.

La classification spectrale du catalogue est basée sur une décomposition en composantes principales (“Principal Component Analysis” ou PCA en anglais), prenant en compte les différents intervalles de longueur d’onde décrits par les spectres (Galaz 1997; Galaz & de Lapparent 1998; de Lapparent et al. 2003). Il avait déjà été montré que les couleurs des galaxies peuvent être décrites par une combinaison linéaires des couleurs stellaires (Aaronson 1978). La méthode PCA fournit une démonstration plus générale de cet effet sur un grand échantillon de spectres et à plus grand décalage vers le rouge. Elle permet d’écrire chaque spectre comme une combinaison linéaire de 3 composantes qui reproduisent 98% du flux des galaxies : les 2 premières composantes déterminent la proportion des différentes populations stellaires présentes dans chaque galaxie, alors que la 3ème composante détermine la contribution des raies nébulaires. Cela fournit une classification continue dans un espace à 2 paramètres, indépendante de tout spectre de référence. Les deux paramètres de classification sont de surcroît corrélés, les galaxies de type tardif ayant des raies d’émission plus fortes. Cette classification présente l’avantage d’être faiblement dépendante du niveau de bruit des spectres. Elle est de surcroît étroitement liée à la classification morphologique (Connolly et al. 1995; Sodre & Cuevas 1997). En projetant les spectres de référence de Kennicutt (1992) sur la séquence PCA, nous constatons que la séquence de Hubble s’organise de façon monotone dans le sens d’un accroissement de la contribution des jeunes populations stellaires et des raies nébulaires pour les types plus tardifs. Par ailleurs, nous estimons que les fractions de galaxies ESO-Sculpteur ayant des spectres similaires aux spectres de référence pour les types morphologiques E, S0, Sa, Sb, Sc, et Sm/Im sont : 17%, 9%, 15%, 32%, 24%, et 3% (Galaz & de Lapparent 1998).

La connaissance des types spectraux des galaxies permet le calcul des corrections-k, donnant la transformation des magnitudes apparentes observées en magnitudes absolues. Les correction-k sont fonction

de la répartition spectrale de chaque galaxie, et de son décalage spectral. Ces calculs, qui nécessitent la connaissance de la partie UV non-observée des spectres, sont basés sur les spectres de bibliothèques de synthèse spectrale (Fioc & Rocca-Volmerange 1997; Bruzual & Charlot 1993). Nous avons développé une méthode originale selon laquelle les spectres observés sont comparé aux spectres synthétiques au moyen de la classification spectrale PCA. La précision des magnitudes absolues qui en résultent en BVR_c est de 0.1 à 0.2 mag (Galaz & de Lapparent 1998; de Lapparent et al. 2003). Une évaluation détaillée de la qualité des données photométriques, de la classification spectrale, des corrections K , et de la calibration en flux de la spectroscopie du relevé ESO-Sculpteur est produite dans de Lapparent et al. (2003, article choisi n° 3, p. 67).

2.5 Article choisi n° 1

“The ESO-Sculptor Survey: spectral classification of galaxies with $z \leq 0.5$ ”

Galaz, G., **de Lapparent**, V.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 332, pp. 459-478
1998

Chapitre 3

Structuration à grande échelle

3.1 Introduction

Les cartes du “Center for Astrophysics Redshift Survey”, complètes jusqu’à $m_{B(0)} = 15.5$ et couvrant une fraction importante de l’hémisphère nord, avaient suggéré une nouvelle image de la distribution des galaxies à grande échelle : de grandes régions vides de galaxies de diamètre compris entre 15 et 70 Mpc, et délimitées par de minces feuillets de quelques megaparsecs d’épaisseur (de Lapparent et al. 1986a), comme montré dans le diagramme central de la Fig. 3.1. Des mesures de la dimensionnalité des structures basées sur la variation des comptages dans des cellules de taille variable (de Lapparent et al. 1991) avaient indiqué un accord avec un réseau de structures à 2 dimensions. Dans cette distribution cellulaire, des structures cohérentes sur des échelles comparables à la taille des cartes peuvent apparaître sous la forme de grands murs (Geller & Huchra 1989; voir aussi Stoughton et al. 2002).

Les résultats du “Center for Astrophysics Redshift Survey” causèrent un regain d’intérêt pour la cartographie des grandes structures de l’Univers, qui conduisit à l’acquisition de nouveaux catalogues sondant la distribution des galaxies à plus grand décalage vers le rouge ($z \sim 0.1$, soit ~ 400 Mpc). Malgré leur échantillonnage partiel (ou incomplétude), les premiers de ces catalogues confirmèrent la structuration en vides et feuillets de la distribution, avec une taille de vides dans l’intervalle 30-150 Mpc (Shectman et al. 1996; Vettolani et al. 1997; Schuecker & Ott 1991). Ce n’est qu’avec la mise en place des grands relevés 2dF et SDSS, visant à obtenir la spectroscopie à fibre pour des centaines de milliers de galaxies jusqu’à une magnitude apparente $r \sim 17.8$ que l’on pu disposer de grand échantillons statistiques (Stoughton et al. 2002; Colless et al. 2003b). Les cartes tri-dimensionnelles de la distribution des galaxies obtenues par ces deux relevés (voir Fig. 3.1) montrèrent que l’alternance de vides et minces feuillets de galaxies est omniprésente dans les nouvelles régions explorées à $z \lesssim 0.2$, et permirent de caractériser mathématiquement la nature des grandes structures.

La nature cellulaire de la distribution peut être décrite par une topologie en éponge (Vogeley et al. 1994), celle-ci découlant naturellement d’un spectre de fluctuations primordiales de matière dont les amplitudes suivent une loi de répartition gaussienne Hamilton et al. (1986); Weinberg et al. (1987). L’intérêt des mesures de topologie réside dans la contrainte qu’elles posent sur les moments d’ordre élevé de la distribution; elles fournissent ainsi un test des simulations numériques qui sont ajustées pour avoir le même spectre de puissance que les observations. La topologie de la distribution des galaxies a été mesurée par le “genus”, en construisant la surface d’iso-densité à une densité de seuil donnée, puis en mesurant la différence entre le nombre de trous (de type “beignet”) et le nombre de régions isolées observés dans cette surface. Le genus est aussi l’intégrale de la courbure Gaussienne le long de la surface d’iso-densité (Gott et al. 1986, 1987).

Dans la topologie en éponge qui résulte de fluctuations gaussiennes, les variations du genus en fonction de la densité sont symétriques aux hautes et basses densités, ce qui signifie que les surfaces d’iso-densité séparant les régions de haute et faible densité ont les mêmes propriétés topologiques. En particulier, à la densité intermédiaire séparant le relevé en deux volumes égaux, les régions de haute et basse densité

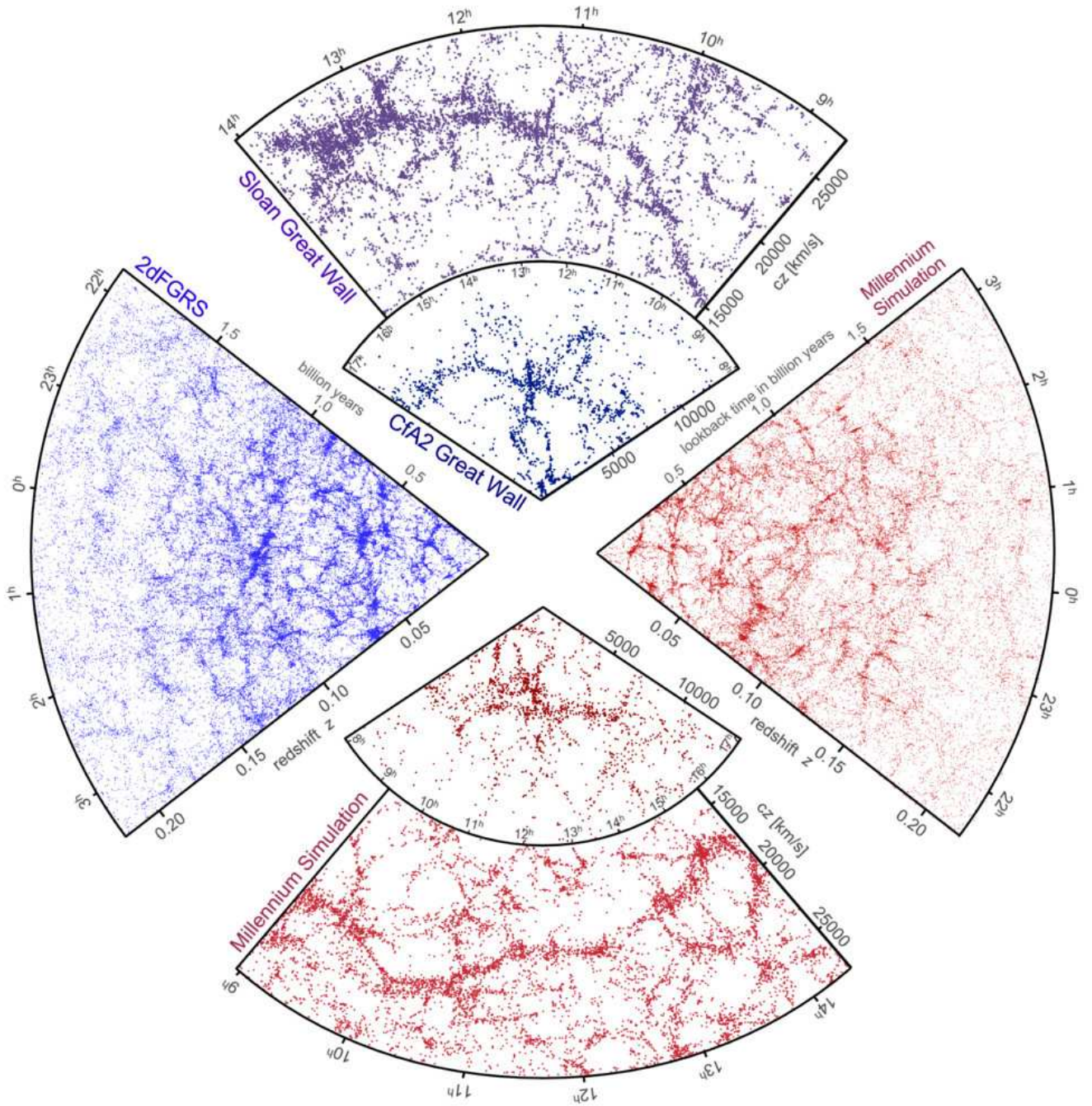


FIG. 3.1 – Une synthèse des observations et simulations numériques concernant la répartition des galaxies à grande échelle (image provenant du “Millennium Simulation Project”, Max-Planck-Institut für Astrophysik).

forment deux structures continues imbriquées l’une dans l’autre et contenant de nombreux trous mais aucune région isolée; on peut donc aller de tout endroit d’un des deux volumes à un autre sans traverser la surface d’iso-densité. Lorsque l’on isole les régions de haute et faible densité, les volumes se morcellent en faveur de régions isolées, et le genre devient négatif, avec un comportement similaire vers les hautes et les basses densités.

Les mesures du genre appliquées au relevé SDSS permettent de comparer avec une excellente statistique l’Univers observé aux résultats des simulations numériques avec matière noire et constante cosmologique (Springel et al. 2005). Les variations du genre pour le relevé SDSS sont proches de celles attendues pour des fluctuations Gaussiennes (Gott et al. 2009), qui sont elles-mêmes en bon accord avec celles mesurées pour les simulations numériques de matière noire (Springel et al. 2005; Park et al. 2005b). Des déviations par rapport à une topologie en éponge sont cependant mesurées dans le relevé SDSS sous la forme d’une légère prééminence des structures connexes de type amas (Gott et al. 2008). Cette déviation pourrait être entièrement due aux galaxies brillantes, alors que la topologie de la distribution des galaxies peu lumineuses montrent plutôt une prééminence des vides, soit une topologie de type “bulles” (Park et al. 2005a). Des différences dans la topologie en fonction de la luminosité, la couleur et la morphologie des galaxies posent en outre des contraintes sur les scénarios semi-analytiques de formation des galaxies Choi et al. (2010). Enfin, les mesures de “squelette” offrent une approche intéressante pour caractériser le réseau de filaments et faire le lien avec la théorie (Pogosyan et al. 2009; Sousbie et al. 2009), mais l’application aux données observationnelles n’a pas encore été suffisamment explorée (Sousbie et al. 2008).

3.2 Un pinceau à travers la toile cosmique

Article: “Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”, Bellanger, C., **de Lapparent**, V., 1995, *ApJ Letters* 445, pp. L103-L107

Les résultats du catalogue ESO-Sculpteur ont permis de lever par l’observation l’ambiguïté posée par un sondage voisin dans le ciel (Broadhurst et al. 1990), qui suggèrait une répartition périodique des galaxies le long de la ligne-de-visée, avec une période de $128 h^{-1} \text{ Mpc}$ (si l’on utilise une constante de Hubble $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Ces résultats furent mis en défaut par diverses analyses statistiques montrant que le regroupement des galaxies aux échelles inférieures à $5 h^{-1} \text{ Mpc}$, qui se matérialise par la présence de groupes de galaxies dans les filaments et d’amas aux intersections de ceux-ci, peut générer des périodicités telles que celles observées par Broadhurst et al. (1990), avec une probabilité de quelques pourcents à une dizaine de pourcents dans un Univers n’ayant pas de fluctuations primordiales à très grande échelle (Kaiser & Peacock 1991; Weiss & Buchert 1993). En outre, Park & Gott (1991) montrèrent qu’il n’y avait pas de différence statistique dans la mesure de périodicité entre les observations de Broadhurst et al. (1990) et des pinceaux étroits de même géométrie extraits de simulation numériques avec matière noire froide.

Les pinceaux de (Broadhurst et al. 1990) sont par ailleurs trop étroits pour détecter tous les filaments interceptés (ils échantillonnent transversalement moins de $5 h^{-1} \text{ Mpc}$ des filaments interceptés, soit la longueur de corrélation des galaxies), et des simulations de pinceaux étroits montrèrent que la taille typiques des vides observés dans le relevé du CfA ($\lesssim 60 h^{-1} \text{ Mpc}$) est compatible avec la détection de pics marqués tous les $120 h^{-1} \text{ Mpc}$ (de Lapparent et al. 1991).

En revanche, par sa couverture angulaire continue, et par son taux de complétude élevé, le relevé ESO-Sculpteur permet une cartographie détaillée de la distribution des galaxies à grande distance : $0.1 \leq z \leq 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995). La Fig. 3.2 montre qu’il apparaît dans le relevé ESO-Sculpteur la même remarquable alternance de vides et filaments que celle détectée dans les catalogues de l’Univers proche, ce qui fut la première indication que cette structuration à grande échelle persiste à $z \sim 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995). De surcroît, le diamètre typique des vides à grande distance est de 20–40 Mpc (avec $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$), en bon accord avec les structures proches. Ces résultats furent ensuite confirmés par des sondages analogues à une profondeur similaire (Small et al. 1999; Yee et al. 2000).

On remarque que l’échelle de $128 h^{-1} \text{ Mpc}$ (ou 183 Mpc avec $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$), correspondant à un intervalle en décalage spectral de 0.045, est largement échantillonnée par le catalogue ESO-Sculpteur

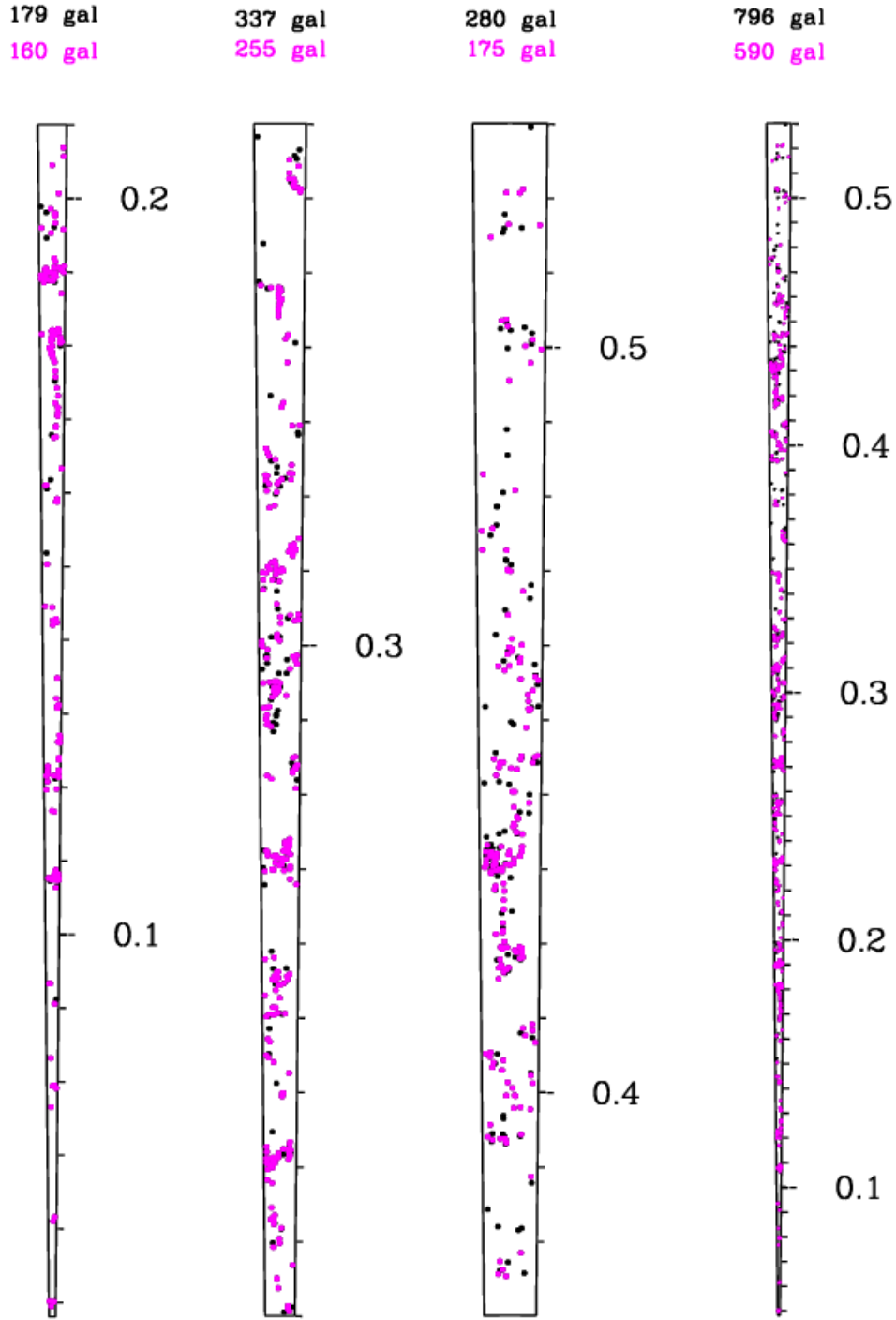


FIG. 3.2 – La distribution spatiale du catalogue spectroscopique du relevé ESO-Sculpteur, dans une région de 0.25 deg^2 du ciel austral. Le cône de droite montre la ligne de visée complète du sondage. Les 3 cônes de gauche permettent une vision rapprochée des structures dans 3 intervalles de décalage spectral adjacents ($0.08-0.21$, $0.21-0.34$, $0.34-0.47$). les galaxies en magenta ont $R_c \leq 20.5$, celles en noir ont $20.5 < R_c \leq 21.5$ (les nombres de galaxies indiqués en noir correspondent cependant à tous les objets avec $R_c \leq 21.5$). La nature cellulaire de la distribution des galaxies à grande échelle se prolonge à grande distance, sous forme d'une alternance de vides et feuillets espacés de $\sim 25 - 40 \text{ Mpc}$.

(sondant une région de $\sim 2800 h^{-1}$ Mpc ou ~ 2000 Mpc avec $H_0 = 70$ km/s/Mpc) et qu'il n'apparaît pas de structuration marquée à cette échelle particulière. Le relevé ESO-Sculpteur confirme ainsi que les structures détectées par Broadhurst et al. (1990) sont causées par l'association perverse d'une faible couverture angulaire et des fluctuations inhérentes au regroupement des galaxies aux petites échelles. La Fig. 3.2 montre qu'en accord avec le mode de sélection du champ (Sect. 1.4.1), le relevé ESO-Sculpteur ne contient pas d'amas riche de galaxies, mais de nombreux groupes, constitués de galaxies précoces et tardives.

3.3 Article choisi n° 2

“Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”

Bellanger, C., **de Lapparent**, V.

Astrophysical Journal Letters, Vol. 445, pp. L103-L107

1995

3.4 Fonctions de corrélation par type

Article: “Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1-0.5”, 2007, **de Lapparent**, V., Slezak, E., *A&A* 472, pp. 29-49.

Nous avons obtenu la première détection et mesure du regroupement plus serré d’un facteur 2 des galaxies rouges par rapport aux galaxies bleues à partir d’un catalogue profond de 20 000 galaxies à $V < 23.5$ (Cabanac et al. 2000), observé avec la caméra UH8K au TCFH (précurseur de MEGACAM). Le relevé ESO-Sculpteur permet d’aller plus loin dans la distinction du regroupement entre les divers types de galaxies. Pour cette analyse, on utilisait les 870 galaxies du relevé avec $R_c \leq 21.5$, complet à 52% jusqu’à cette limite, résultant d’une complétude de 92% à $R_c \leq 20.5$ et de 25% pour $20.5 \leq R_c \leq 21.5$.

Par son taux de complétude élevé en décalage vers le rouge, et par sa couverture angulaire continue, le relevé ESO-Sculpteur permet une mesure quantitative du regroupement à grande échelle, au moyen des fonctions de corrélation spatiales à 2-points. Afin de détecter des effets de ségrégation liés à la nature des galaxies, nous mesurâmes les fonctions de corrélation pour les différents types de galaxies mis en évidence par les fonctions de luminosité (Sect. 2.4.1). Le résultat principal est montré dans la Fig. 3.3. À petite échelle ($\leq 0.3 h^{-1}$ Mpc), le signal est dominé par les galaxies géantes de type spectral précoce (E, S0, Sa), puis par les galaxies naines (dE, dI), alors que les galaxies spirales tardives (Sb, Sc, Sd/Sm) montrent une bien plus faible corrélation spatiale. Aux échelles de ~ 0.5 à $10 h^{-1}$ Mpc, les galaxies géantes précoces et les spirales tardives ont la même fonction de corrélation, alors qu’il n’y a pas de corrélation significative des galaxies naines à ces échelles (de Lapparent & Slezak 2007).

Nous avons aussi calculé les fonctions de corrélation croisées entre les divers types de galaxies, et celles-ci indiquent que les galaxies géantes de type précoce ont tendance à se placer au centre des halos les plus massifs, alors que les galaxies spirales tardives occupent plutôt la périphérie de ces halos, ou le centre des halos moins massifs. En outre, les galaxies naines sont peu mélangées avec les galaxies spirales tardives, et sont préférentiellement localisées comme satellites des galaxies géantes de type précoce (de Lapparent & Slezak 2007). Certains de ces effets sont visibles à l’œil dans les diagrammes en cône de la Fig. 5 de l’article choisi n° 3, p. ci-après : on voit par exemple que les galaxies précoces sont plutôt dans les régions centrales des groupes.

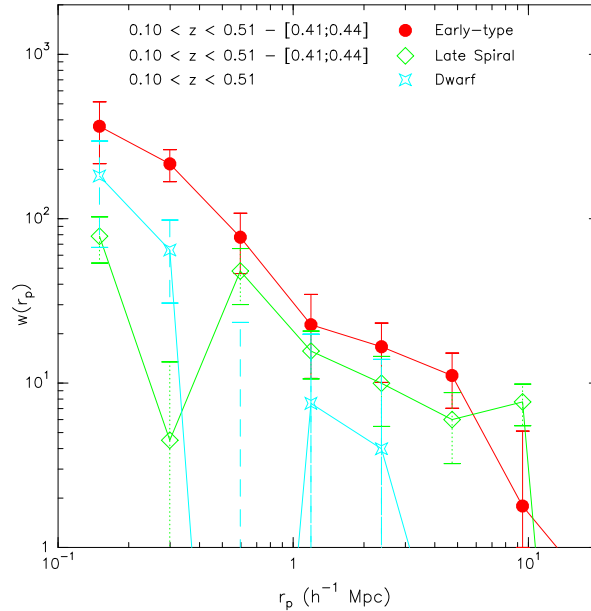


FIG. 3.3 – Les fonctions de corrélation du relevé ESO-Sculpteur pour les galaxies géantes, de type précoce (E, S0, Sa), et de type spirales tardives (Sb, Sc, Sd/Sm), et les galaxies naines (dE, dI).

Un autre résultat intéressant est que ces diverses fonctions de corrélation révélèrent un comportement

bimodal analogue à celui attendu dans les modèles contemporains de formation hiérarchique des galaxies au sein des halos de matière noire (Jenkins et al. 2001; Berlind & Weinberg 2002; Berlind et al. 2003) : à petite échelle, la fonction de corrélation est dominée par la composante intra-halo, provenant des paires de galaxies résidant dans un même halo de matière noire ; à grande échelle, c’est la composante inter-halo, correspondant aux paires de galaxies appartenant à des halos différents, qui domine ; cette dernière reproduit ainsi la fonction de corrélation de la matière. La transition entre les 2 régimes est observée à $\sim 1 h^{-1}$ Mpc dans le relevé ESO-Sculpteur (voir la courbe des types précoces “early-type” dans la Fig. 3.3). Dans les modèles, cette transition s’opère à une échelle comparable au diamètre du viriel des grands halos, et les caractéristiques de la transition (force et échelle) dépendent de la fraction relative de galaxies dans les halos de faible et grande masse. Dans ce contexte, le relevé ESO-Sculpteur indiqua que les galaxies géantes de type précoce ont tendance à se placer au centre des halos les plus massifs, alors que les galaxies spirales tardives occupent plutôt la périphérie de ces halos, ou le centre des halos moins massifs.

Ce comportement bimodal fut détecté dans les diverses fonctions de corrélation du SDSS sondant la distribution des galaxies à $z \leq 0.1$ (Zehavi et al. 2004, 2005a,b). Notre analyse du catalogue ESO-Sculpteur montra que ce comportement est aussi détecté à plus grand décalage spectral ($z \leq 0.5$), avec des différences spécifiques aux différents types de galaxies. La modélisation de ces résultats devrait fournir des contraintes sur la répartition des multiples types d’objets au sein des halos de matière noire. Sachant que chaque type de galaxie correspond à une histoire spécifique d’accumulation de la masse et de la transformation en étoiles, ces mesures de fonction de corrélation représentent des outils prometteurs pour clarifier notre compréhension des mécanismes de formation des galaxies.

3.5 Article choisi n° 3

“Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1-0.5”

de Lapparent, V., Slezak, E.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 472, pp. 29-49

2007

3.6 Fluctuations à très grande échelle

Des fluctuations de densité à l'échelle de $\sim 150\text{--}200$ Mpc sont présentes dans le relevé ESO-Sculpteur. La Fig. 3.4 montre que les régions situées dans l'intervalle $0.33 < z < 0.39$ (soit ~ 213 Mpc en intervalle de distance comobile) et dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$ (~ 170 Mpc) sont sous-denses et sur-denses resp. par rapport au nombre de galaxies attendues dans un échantillon qui serait spatialement homogène, pour toutes les combinaisons de types géantes. Les galaxies naines (dE+Im) sont intrinsèquement trop peu lumineuses pour être détectées dans le relevé à $z \gtrsim 0.4$; on remarque cependant bien la chute brutale de densité à $z \simeq 0.3$. Ces fluctuations sont bien visible dans le diagramme en cône complet de la Fig. 3.2, et apparaissent comme une alternance d'un creux puis d'un excès. Ces deux fluctuations de densité étaient déjà visibles dans les diagrammes en cône basé sur l'échantillon spectroscopique incomplet à 50% (Bellanger & de Lapparent 1995, voir Fig. 1). Ces structures produisent un signal alternativement positif et négatif dans les fonctions de corrélation entre 50 et 200 Mpc, et un excès de corrélation aux échelles entre 5 et 20 Mpc (voir Figs. 4, 7 et 9 de l'article choisi n° 3, p. 69, de Lapparent & Slezak 2007).

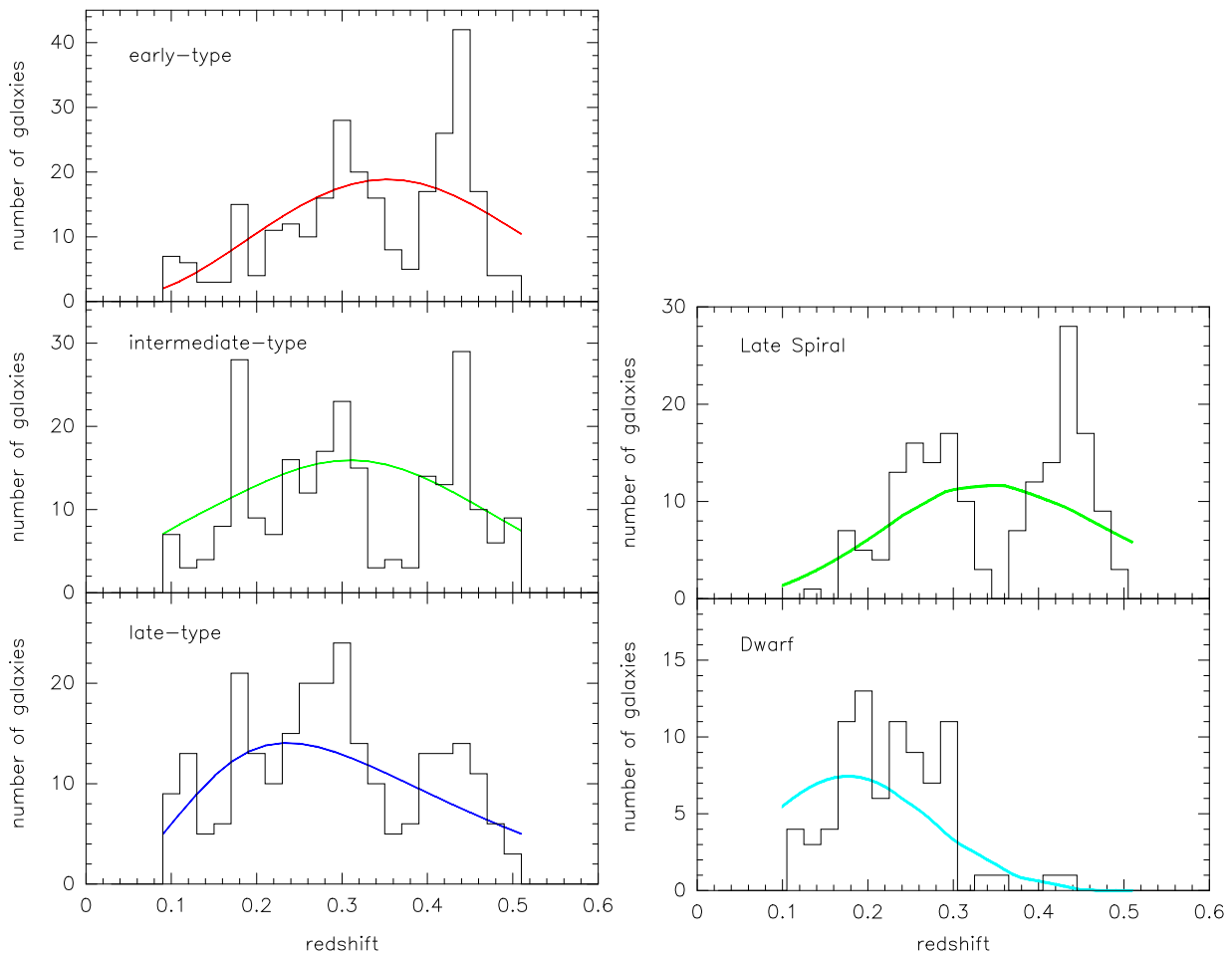


FIG. 3.4 – *A gauche, les histogrammes en décalage spectral des galaxies de type spectral précoce E+S0+Sa, (haut), intermédiaire Sb+Sc (centre), and tardif Sc+Sd/Sm (bas) du relevé ESO-Sculpteur. Les courbes continues indiquent les distributions attendues pour des échantillons de même combinaison de types et avec les fonctions de luminosité que dans le relevé observées, mais répartis spatialement de façon homogène. A droite, on montre la distribution des galaxies de type spectral Sb+Sc+Sd/Sm, et la distribution des galaxies naines Im+dE.*

J'évalue ici le niveau de vraisemblance de ces fluctuations, en prenant en compte l'excès de variance

prédit par les fonctions de corrélation mesurées par de Lapparent & Slezak (2007, voir Sect. précédente). Pour estimer le nombre de galaxies prédites pour un échantillon homogène, je prends en compte les types spectraux des différentes galaxies, et les corrections-K et fonctions de luminosité correspondantes. Les nombres de galaxies observés N_{obs} et prédits N_{pred} , ainsi que l’excès ou le défaut de densité N_{obs}/N_{pred} sont indiqués pour les 2 régions considérées dans la Table 3.6. On indique aussi les valeurs correspondantes pour l’ensemble des galaxies de tous types dans chaque région.

La colonne N_{obs}/N_{pr} de la Table 3.6 montre que pour les types spectraux précoces (E+S0+Sa) et tardifs (Sc+Sd/Sm+Im), ainsi que pour tous les types réunis, les 2 régions $0.33 < z < 0.39$ et $0.41 < z < 0.46$ sont sous-dense et sur-dense resp. d’un facteur ~ 2 . Pour les galaxies de type spectral intermédiaire (Sb+Sc+dE), N_{obs}/N_{pr} diminue à $\sim 1/4$ dans la région de la sous-densité.

La Table 3.6 indique aussi le contraste de densité $\Delta N/N_{pr} = (N_{obs} - N_{pr})/N_{pr}$ de chaque structure pour les différents regroupements de types de galaxies, avec un contraste nul attendu pour une distribution homogène. Nous estimons le niveau de significativité des contrastes mesurés. La variance du contraste est la somme des variances relatives sur N_{pr} et N_{obs} . La première variance est le terme de Poisson $1/N_{pr}$. Dans le formalisme de la fonction spatiale de corrélation, la seconde variance est la somme du terme de Poisson $1/N_{pr}$ et de la double intégrale en volume (normalisée) de la fonction de corrélation, soit :

$$\sigma^2 \left(\frac{\Delta N}{N_{pr}} \right) = \frac{2}{N_{pr}} + \frac{1}{V^2(z_{min}, z_{max})} \int_{V(z_{min})}^{V(z_{max})} \xi(r_p, \pi) dV_1 dV_2, \quad (3.1)$$

où $V(z_{min}, z_{max})$ est le volume comobile intercepté par le relevé entre z_{min} et z_{max} , et r_p et π les séparations projetées et le long de la ligne de visée des galaxies. L’utilisation de $\xi(r_p, \pi)$ conduit à une estimation non biaisée par les distortions en décalage vers le rouge dues aux vitesses propres des objets. L’intégrale est calculée en utilisant la fonction de corrélation effectivement mesurée par de Lapparent & Slezak (2007) pour l’ensemble du relevé. Les valeurs des 2 termes de variance intervenant dans l’Eq. 3.1 pour les différents types sont indiqués dans la Table 3.6, ainsi que la valeur correspondante de l’écart-type $\sigma(\Delta N/N_{pr})$, et le niveau de significativité $\Delta N/N_{pr}/\sigma(\Delta N/N_{pr})$.

On constate que la variance due au regroupement des galaxies est supérieure au terme de Poisson d’un facteur 3. Si les niveaux de significativité ne sont que de 1.5 à 2.0 σ pour la sous-densité, ils sont $\geq 2.5 \sigma$ pour la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$, que l’on considère l’ensemble des galaxies ou uniquement les galaxies de type précoce.

On peut aussi effectuer le calcul du terme de variance causé par le regroupement des galaxies en utilisant la fonction de corrélation obtenue sans la sur-densité. En effet, cette structure introduit un excès de corrélation marqué dans $\xi(s)$ aux échelles > 2 Mpc, et entre 3 et 10 Mpc dans $\omega(r_p)$, la fonction de corrélation projetée; cette dernière se retrouve déformée par rapport à la loi de puissance qu’elle décrit habituellement à ces échelles de Lapparent & Slezak (2007). On peut en déduire que le relevé ESO-Sculpteur n’est pas un échantillon représentatif de la distribution des galaxies, et que cette structure accroît artificiellement l’amplitude du regroupement des galaxies à ces échelles. En faisant l’hypothèse que la fonction de corrélation spatiale mesurée dans le relevé ESO-Sculpteur sans la structure sur-dense à $0.41 < z < 0.46$ est plus proche de la fonction de corrélation “universelle” des galaxies, alors on peut réévaluer les niveaux de significativité dans la Table 3.6. Celles-ci apparaissent dans la colonne de variance due au regroupement avec l’indication “SSD” (pour “sans sur-densité”).

Pour tester la méthode, on a effectué les mêmes calculs pour la région sur-dense à $0.27 < z < 0.33$, qui précède (en z) la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$, ainsi que pour 2 régions plus petites à $0.17 < z < 0.20$ et $0.25 < z < 0.26$, localisées sur des groupes de galaxies, et causant pour première un pic marqué dans les histogrammes de la Fig. 3.4 (y compris dans celui des galaxies naines). Les résultats figurent également dans la Table 3.6. Les densités relatives de ces régions sont typiquement de $\simeq 1.5$, et les niveaux de significativité sont $\simeq 0.6 - 1.1 \sigma$ (selon la fonction de corrélation utilisée), sauf pour la région à $0.17 < z < 0.20$ avec $1.2 - 1.7 \sigma$ pour tous les types réunis, et $2.1 - 2.7 \sigma$ pour les galaxies de type intermédiaire (on remarque un pic très marqué dans la Fig. 3.4). Ces tests montrent que l’excès de variance dû à la fonction de corrélation suffit à décrire ces sur-densités de tailles diverses.

Avec un niveau de significativité de 2.59σ ou 3.33σ (selon la fonction de corrélation utilisée), la région sur-dense à $0.41 < z < 0.46$ est une fluctuation de densité assez rare, avec une probabilité de

TAB. 3.1 – *Contraste et niveau de significativité des fluctuations de densité dans le relevé ESO-Sculpteur*

Intervalle Volume (Mpc ³)	Type	$\frac{N_{obs}}{N_{pr}}$		$\frac{\Delta N}{N_{pr}}$	$\frac{2}{N_{pr}}$	$\frac{\int \xi}{V^2}$	σ	Sig.	$\frac{\int \xi}{V^2}$ SSD	σ	Sig.
0.41-0.46	E+S0+Sa	81 34.8	= 2.33	1.33	0.0575	0.1552	0.46	2.88	0.0836	0.38	3.54
170 Mpc	Sb+Sc+dE	49 24.9	= 1.98	0.98	0.0802	0.1552	0.49	2.04	0.0836	0.40	2.44
35705	Sc+Sm+Im	38 21.1	= 1.83	0.83	0.0949	0.1552	0.50	1.69	0.0836	0.42	2.00
	Tout	168 80.8	= 2.09	1.09	0.0247	0.1552	0.42	2.59	0.0836	0.33	3.33
0.33-0.39	E+S0+Sa	29 50.2	= 0.58	-0.42	0.0398	0.1168	0.40	-1.09	0.0534	0.31	-1.41
213 Mpc	Sb+Sc+dE	10 39.1	= 0.26	-0.74	0.0511	0.1168	0.41	-1.81	0.0534	0.32	-2.29
31896	Sc+Sm+Im	21 36.8	= 0.57	-0.43	0.0543	0.1168	0.41	-1.06	0.0534	0.33	-1.34
	Tout	60 126.2	= 0.47	-0.53	0.0159	0.1168	0.36	-1.46	0.0534	0.26	-2.01
0.27-0.33	E+S0+Sa	64 48.2	= 1.33	0.33	0.0415	0.1077	0.39	0.85	0.0455	0.29	1.11
220 Mpc	Sb+Sc+dE	55 41.3	= 1.33	0.33	0.0484	0.1077	0.40	0.81	0.0455	0.31	1.04
23657	Sc+Sm+Im	58 46.2	= 1.25	0.25	0.0433	0.1077	0.39	0.64	0.0455	0.30	0.83
	Tout	177 135.7	= 1.30	0.30	0.0147	0.1077	0.35	0.85	0.0455	0.25	1.21
0.25-0.26	E+S0+Sa	10 7.0	= 1.43	0.43	0.2855	0.3018	0.77	0.56	0.1677	0.67	0.63
38 Mpc	Sb+Sc+dE	11 6.6	= 1.67	0.67	0.3041	0.3018	0.79	0.86	0.1677	0.69	0.98
2985	Sc+Sm+Im	14 8.6	= 1.62	0.62	0.2316	0.3018	0.73	0.85	0.1677	0.63	0.98
	Tout	35 22.2	= 1.58	0.58	0.0900	0.3018	0.63	0.92	0.1677	0.51	1.13
0.17-0.20	E+S0+Sa	19 13.3	= 1.43	0.43	0.1499	0.1868	0.58	0.72	0.0709	0.47	0.90
117 Mpc	Sb+Sc+dE	35 16.0	= 2.20	1.20	0.1254	0.1868	0.56	2.12	0.0709	0.44	2.68
5076	Sc+Sm+Im	32 25.7	= 1.25	0.25	0.0780	0.1868	0.52	0.48	0.0709	0.39	0.64
	Tout	86 55.0	= 1.57	0.57	0.0364	0.1868	0.47	1.19	0.0709	0.33	1.72

Note:

- La 1^{ère} colonne indique successivement l'intervalle en décalage spectral, l'intervalle en distance comobile, et le volume comobile de la région considérée.

10^{-2} à 10^{-3} . Dans la région angulaire couverte par le relevé, la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ soutend $\sim 5 \times 25 \text{ Mpc}^2$ perpendiculairement à la ligne-de-visée, par 170 Mpc le long de la ligne de visée. Pour augmenter de façon marqué le niveau de significativité de cette structure, il faudrait qu'elle persiste au delà de l'angle solide du relevé ESO-Sculpteur avec le même contraste de densité.

Par exemple pour un angle solide de 2×2 degré-carrés, c'est à dire le double de l'étendue en ascension droite du relevé et 15 fois l'étendue angulaire en déclinaison, on calcule un niveau de significativité de 4.1σ , et 5.0σ dans le cas "SSD", soit des probabilités de 4×10^{-5} et 6×10^{-7} resp. Une région de 2×2 degré-carrés du ciel soutend une région de $\sim 55 \times 55 \text{ Mpc}^2$ à $z \sim 0.43$. Quant à la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$, son niveau de significativité pour un relevé de 2×2 degré-carrés deviendrait 1.9σ , et 2.3σ dans le cas "SSD", ce qui resterait marginal. Il sera possible d'examiner si la fluctuation de densité à $0.41 < z < 0.46$ s'étend angulairement avec la photométrie optique et infrarouge qui sera obtenue avec le VST et VISTA dans cette region du ciel (relevés KIDS et VIKING). Il faudra alors utiliser les décalages vers le rouge photométriques, avec des contraintes sur la précision des observations qui sont examinées dans la Sect. 4.1.

Il faut souligner que ce type de fluctuation est distinct des oscillations baryoniques acoustiques, qui sont détectées à des échelles similaires, mais dont le contraste est beaucoup plus faible, d'environ 10% (Eisenstein et al. 2005). En examinant les diagrammes en cone de la Fig. 3.2, on remarque que la région sur-dense à $0.41 < z < 0.46$ correspond à une collection de groupes de galaxies, et non pas à un superamas au sens standard du terme, c'est-à-dire constitué de plusieurs amas de galaxies, comme Corona Borealis par exemple (Postman et al. 1988).

AJOUT: Des fluctuations de densité dans la distribution des galaxies indiquent des fluctuations similaires dans la distribution de masse, à moins qu'il y ait des variations systématiques à grande échelle du biais. La question de la taille et de la fréquence de telles structures se pose, car ces deux paramètres sont simultanément contraints dans un Univers provenant d'un champ Gaussien de perturbations initiales (Miller et al. 2004). Je montre dans la Sect. 3.7 ci-dessous que les grandes fluctuations de densité détectées dans le relevé ESO-Sculpteur se produisent très rarement dans les simulations à N-corps du "Millennium", en bon accord avec les niveaux de significativité dérivés ici au moyen de la fonction de corrélation.

Les grands volume sondés par les grands relevés 2dF et SDSS à $z \lesssim 0.2$ donnaient l'espoir que des volumes représentatifs de la distribution des galaxies et de la distribution de matière noire sous-jacente avaient été atteints. Pourtant, des fluctuations de densité à des échelles de plus de 100 Mpc furent détectées dans ces relevés, sous la forme d'une anisotropie entre les hémisphères galactiques nord et sud. Par un lissage de la distribution des galaxies du relevé SDSS sur des échelles de $10 h^{-1} \text{ Mpc}$ d'une part, et de $0.8 h^{-1} \text{ Mpc}$ d'autre part, Einasto et al. (2003) ont extrait les superamas, ainsi que les groupes et amas individuels contenus dans ces cartes, et mesurèrent leur luminosité intégrée; il en déduisirent une anisotropie caractérisée par le fait que les superamas et amas sont 2 fois plus lumineux dans l'hémisphère nord galactique que dans l'hémisphère sud. Ces effets furent confirmés par le catalogue d'amas de galaxies du relevé 2dF (De Propriis et al. 2002). Et dans le catalogue de "vides" du relevé 2dF, Hoyle & Vogeley (2004) constatèrent que les vides de l'hémisphère sud galactique présentent des densités plus faibles que dans l'hémisphère nord.

Des effets similaires furent détectés dans les comptages infrarouge dans la bande K (obtenus par cross-identification entre le relevé 2dF et le relevé 2MASS; Cole et al. 2001), sous la forme d'une déficience de 30% à $z \leq 0.1$ dans l'hémisphère sud galactique par rapport à l'hémisphère nord (Frith et al. 2003). Cet effet fut confirmé par une réanalyse des comptage optiques dans le relevé 2dF, basée sur une photométrie améliorée permettant de vérifier l'échelle de magnitude. Ces nouvelles observations confirmèrent la déficience de 30% à $z \leq 0.1$ dans l'hémisphère sud galactique du relevé 2dF, aux magnitudes plus brillantes que ~ 17 (Buswell et al. 2004). Cette anisotropie avait été détectée auparavant dans le relevé en décalage vers le rouge "Durham-UK-Schmidt" (Ratcliffe et al. 1998). Cette sous-densité est visible dans la distribution en décalage vers le rouge de l'hémisphère sud galactique du relevé 2dF à $z \leq 0.1$, alors qu'à $z \geq 0.1$, la distribution en décalage vers le rouge atteint une densité proche de celle de l'hémisphère nord (Colless et al. 2003b).

Buswell et al. (2004) avaient également détecté un "vide local" dans l'ensemble du catalogue de l'APM (Maddox et al. 1990c) avec une déficience de 25% aux magnitudes $B \leq 17$, suggérant une sous-densité s'étendant sur $\sim 300 h^{-1} \text{ Mpc} \times 300 h^{-1} \text{ Mpc}$ sur le ciel, ainsi que sur $\sim 300 h^{-1} \text{ Mpc}$ le long de

la ligne de visée. Cette sous-densité correspond par ailleurs à la sous-densité détectée dans le catalogue d’amas de galaxies de l’hémiphère sud galactique du relevé 2dF par (De Propris et al. 2002).

Des très grande structures sur des échelle de $\sim 100 h^{-1}$ Mpc furent aussi détectées dans la distribution des radio-galaxies à $z \simeq 0.27$ (Brand et al. 2003), et dans la distribution des quasars à $z \sim 1.2$ (Clowes & Campusano 1991). Dans cette dernière analyse, la structure est associée à un excès d’absorbants MgII (Williger et al. 2002), ainsi qu’à un excès de galaxies évoluant de façon “passive” (Haines et al. 2004); une sur-densité de taille similaire est en outre détectée à $z \sim 0.8$ par Haines et al. (2004).

3.7 Comparaison avec les simulations du Millennium

J’utilise les simulations à N-corps du “Millennium” (Springel et al. 2005) pour extraire des pinceaux étroits ayant la même géométrie que le relevé ESO-Sculpteur. La simulation adaptée pour cette analyse est celle qui décrit l’évolution de $\sim 10^{10}$ particules de matière noire dans un cube de 500 Mpc de côté, dans lesquelles les galaxies sont introduites au moyen de la prescription semi-analytique de De Lucia et al. (2006). J’utilise les “instantanés” (“snapshots” en anglais) n° 63 et 48, téléchargées à l’IAP par Gilles Missonnier, et correspondant aux décalages spectraux de 0 et 0.509 resp., qui encadrent les valeurs des décalages spectraux pour la majorité des galaxies du relevé ESO-Sculpteur. Pour chacun des 2 instantanés, je tire profit des conditions aux limites périodiques de la simulation pour générer des pinceaux étroits atteignant une distance comobile de 2 000 Mpc ($z = 0.55$ avec les paramètres cosmologiques de la simulation, proches de ceux utilisés dans ce mémoire, voir p. 16).

Je souligne que l’on pourrait rendre ces simulations plus réalistes en extrayant à chaque distance les galaxies de l’instantané au décalage vers le rouge correspondant à la distance. Cela nécessite un espace disque très important (pour télécharger les simulations du “Millennium”) et un travail de programmation significatif qui n’est pas nécessaire pour les tests effectués ici (les conclusions seraient inchangées).

Pour générer les pinceaux, je choisis une face de référence, définissant un plan (X,Y), et je réplique 4 fois le cube de la simulation dans la direction opposée Z, puis l’ensemble des 4 cubes dans la direction Y. Je tire des pinceaux ayant une étendue angulaire correspondant à l’intervalle d’ascension droite et de déclinaison du relevé ESO-Sculpteur. Les pinceaux sont tirés à partir de points de référence distribués dans le plan (X,Y) avec un pas régulier de 40 Mpc en X et en Y; la ligne de visée de tous les pinceaux se trouve dans le plan (Y,Z) et fait un angle de 14.6° avec l’axe Z, ce qui décale de ~ 130 Mpc en Y le croisement de la face $N + 1$ par rapport au croisement de la face N . Cet angle est suffisamment grand pour s’assurer qu’un même pinceau échantillonne des grandes structures distinctes à chaque fois qu’il traverse une nouvelle réplique du cube de la simulation, tout en évitant de répliquer une portion d’un autre pinceau.

Je génère ainsi $11 \times 11 = 121$ pinceaux à partir d’une face. En procédant de la même façon à partir des faces (X,Z) et (Y,Z) du cube de la simulation, j’obtiens 2 fois 121 autres pinceaux, soit un total de 363 pinceaux. J’applique la procédure aux 2 instantanés à $z = 0$ et à $z = 0.509$, et je sélectionne uniquement les galaxies des pinceaux ayant une magnitude $R \leq 20.5$. Les données ESO-Sculpteur de comparaison utilisées vont au delà de $R = 20.5$, avec une limite à $R_c \leq 21.5$, et une complétude décroissante entre ces deux valeurs. On pourrait simuler la même fonction d’incomplétude en magnitude apparente dans les pinceaux extraits du “Millennium”, mais la différence dans le contraste des grandes structures interceptées par les pinceaux est négligeable.

Pour comparer les données avec les simulations, je convertis les décalages vers le rouge en distance comobile, et j’échantillonne la ligne de visée du relevé ESO-Sculpteur avec des pas de 100 Mpc à partir de l’origine, puis avec le même pas, mais avec un décalage d’un demi-pas de l’origine (50 Mpc). Ce décalage des histogrammes permet de s’assurer qu’un pic ou creu de densité est bien réel, et non pas une fluctuation statistique résultant de la position de la grille d’échantillonnage. Puis je divise chaque histogramme des données par la fonction de sélection résultant des fonctions de luminosité des trois populations de galaxies répertoriées dans la Fig. 5.1.

Comme on ne peut séparer dans les décalages vers le rouge des données les composantes spatiales et des composantes de vitesses, j’ajoute aux distances des galaxies dans les pinceaux simulées les composantes

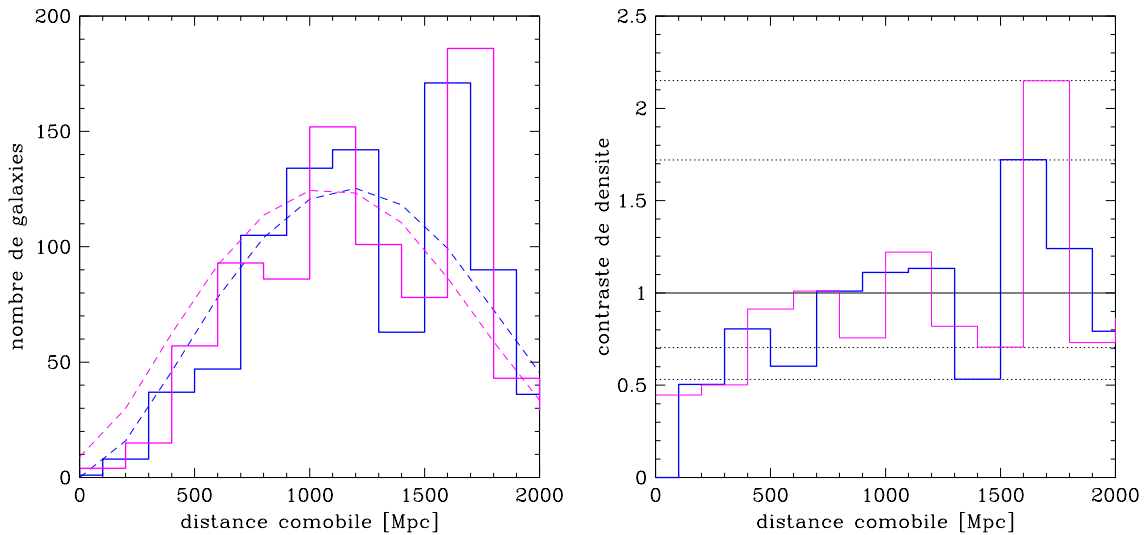


FIG. 3.5 – *A gauche, histogrammes du relevé ESO-Sculpteur à $R_c \leq 21.5$ avec un pas de 100 Mpc et décalés de 50 Mpc, et en ligne tiretée, les fonctions de sélection globales correspondantes. A droite, les distributions de contraste de densité obtenues par le rapport entre les histogrammes et les fonctions de sélections correspondantes. Les niveaux de contraste extrêmes correspondant à la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$, et à la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$ sont indiqués par des lignes pointillées.*

radiales des vitesses propres des objets, afin d’inclure, comme dans les données, les effet de dispersion des vitesses le long de la ligne de visée.

Le panneau de gauche de la Fig. 3.5 montre les histogrammes et fonctions de sélection correspondantes pour le relevé ESO-Sculpteur, et le panneau de droite, les distributions de contraste de densité obtenues en calculant les rapports de densité. On constate que la particularité de la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ est de produire 2 pics se recouvrant dans les deux histogrammes considérés, l’un avec un contraste de 1.72 et l’autre avec un contraste de 2.15 ; en outre, ces pics sont précédés par un creu de contraste 1/1.88 et 1/1.42 selon l’histogramme considéré, et correspondant à la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$, que j’ai examinée dans la Sect. 3.6. On remarque une apparente sous-estimation de la distribution observée par les fonctions de sélection du relevé ESO-Sculpteur aux distances < 500 Mpc, résultat du faible nombre de galaxies observées et des incertitudes sur le comportement des fonctions de luminosité à faible magnitude (voir Sect. 5.3).

Pour les simulations, la fonction de sélection est obtenue en effectuant la moyenne des distributions de galaxies dans les 363 pinceaux. L’absence de fluctuations marquées dans les histogrammes résultants montrés dans le panneau de gauche de la Fig. 3.6 confirme que le cube de la simulation est bien un volume “cosmologique”, compte-tenu du spectre de puissance utilisé. On remarque que la densité de galaxies décroît entre les instantanés à $z = 0.509$ et $z = 0$, à cause des fusions de galaxies. Cependant, le regroupement des galaxies augmente entre $z = 0.509$ et $z = 0$ (voir ci-dessous). En outre, le pic de la fonction de sélection se trouve à une distance comobile de ~ 650 Mpc dans les simulations, alors qu’il est à ~ 1200 Mpc dans le relevé ESO-Sculpteur. Cela résulte de la fonction de luminosité utilisée dans la prescription semi-analytique de De Lucia et al. (2006), qui est différente de celle mesurée dans le relevé ESO-Sculpteur. D’où l’importance d’utiliser les fonctions de sélection pour calculer le contraste de densité des différentes distributions de galaxies. Dans le panneau de droite de la Fig. 3.6, je montre la distribution de contraste pour un pinceau ressemblant au relevé ESO-Sculpteur par la présence d’une sur-densité et d’une sous-densité adjacentes entre 1 000 et 2 000 Mpc, mais inversées en distance (voir plus bas).

Je recherche ensuite dans les distributions de contraste de densité des 363 pinceaux, celles qui présentent un contraste d’au moins 2.15 et 1.72 dans chacun des deux histogrammes décalés avec des intervalles en distance non disjoints. On limite cette recherche à une distance comobile de l’origine entre 1 000 et 2 000 Mpc, afin de sonder la moitié la plus distante des pinceaux ; cela correspondant à l’intervalle

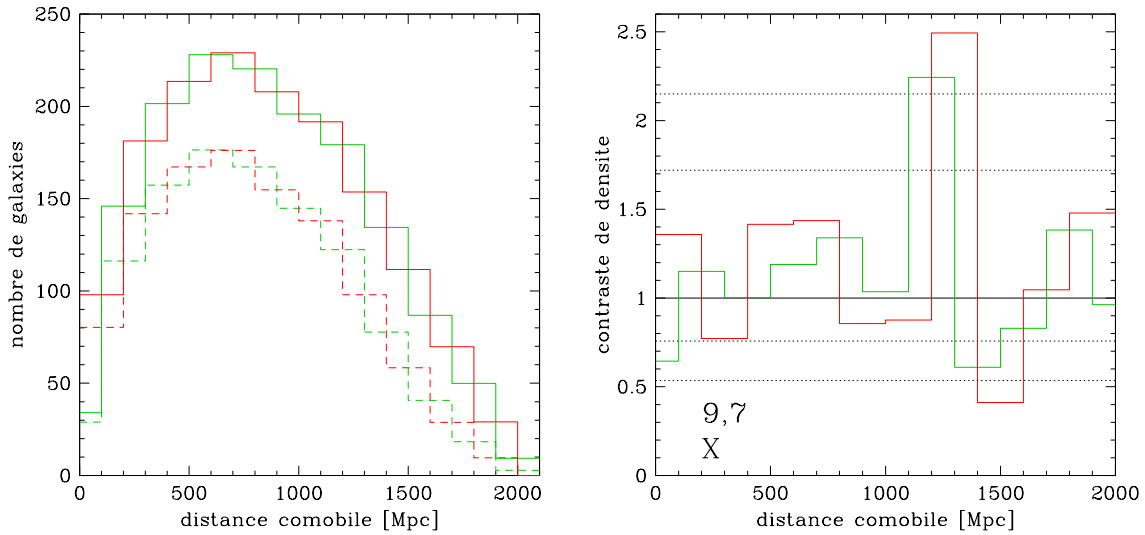


FIG. 3.6 – *A gauche, histogrammes de la moyenne des 363 pinceaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$ avec un pas de 100 Mpc et décalés de 50 Mpc, pour les instantanés à $z = 0.509$ (ligne continue) et à $z = 0$ (ligne tiretée), produisant la fonction de sélection des pinceaux. A droite, les distributions de contraste de densité pour le pinceau $[0,9,Y]$ (voir Fig. 3.7) dans l’instantané à $z = 0.509$.*

de décalage spectral $0.26 < z < 0.55$, qui contient la sur-densité ; à plus faible distance, on échantillonne une étendue transverse plus petite qu’à $z > 0.26$, et la probabilité de trouver des fluctuations de densité d’un contraste donné est par conséquent élevée.

En utilisant l’instantané à $z = 0.509$, je trouve 13 pinceaux avec des contrastes de densité supérieurs à 2.15 et 1.72, et 24 avec l’instantané à $z = 0$, soit des probabilités de 3.6% et 6.6% resp. La différence obtenue entre les deux instantanés résulte du fait qu’au court du temps, et donc quand z décroît de 0.509 à 0, le regroupement des galaxies augmente. Le décalage vers le rouge $z = 0.509$ correspondant à une distance comobile de 1873 Mpc, cet instantané est ainsi plus adapté pour rechercher les fluctuations de densité dans l’intervalle de distance comobile 1 000 - 2 000 Mpc. Si je prend en compte l’incertitude de Poisson de 13% sur les densité de seuil, et que je diminue d’autant les seuils, soit à 1.9 et 1.5, je trouve 22 pinceaux dans l’instantané à $z = 0.509$, soit une probabilité de 6.1% (et 53 pinceaux à $z = 0$, soit 14.6%). Ces diverses probabilités correspondent à un niveau de significativité à $\sim 2 - 2.5$, soit légèrement moins que les niveaux calculés au moyen de la fonction de corrélation dans la Sect. 3.6.

Je montre dans la Fig. 3.7 les distributions de contraste de densité dans les 13 et 24 pinceaux contenant au moins une sur-densité entre 1 000 et 2 000 Mpc avec un contraste supérieur ou égal à la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ du relevé ESO-Sculpteur ; le panneau supérieur correspond à l’instantané $z = 0$, et le panneau inférieur, à l’instantané $z = 0.509$. On peut dans un premier temps observer directement l’augmentation du contraste entre $z = 0.509$ et $z = 0$ en comparant dans la Fig. 3.7 les distributions pour les pinceaux communs ($[4,5,X]$, $[10,7,Y]$, et $[10,7,Z]$ par exemple).

On remarque ensuite dans la Fig. 3.7 qu’un seul pinceau dans l’instantané à $z = 0.509$ présente une sous-densité directement adjacente dans l’intervalle 1 000-2 000 Mpc (et pour les deux échantillonnages d’histogramme) et bornée de l’autre côté par une région de contraste de densité ~ 1 (ce qui permet de délimiter la sous-densité de part et d’autre) : il s’agit du pinceau $[9,7,X]$, qui est montré de plus près dans le panneau de droite de la Fig. 3.6. Dans ce pinceau, la sur-densité se positionne cependant sur la ligne-de-visée *avant* la sur-densité, contrairement aux données. Pour les autres pinceaux, la sur-densité est soit très étendue spatialement (sur plus de 300 Mpc dans les pinceaux $[4,5,X]$, $[10,7,Y]$ et $[7,3,Z]$, par exemple), soit elle est adjacente à des régions de contraste proche de 1 (pinceaux $[0,2,X]$, $[1,3,Z]$, et $[10,7,Z]$ par exemple), soit la sous-densité n’est pas bornée du côté opposé à la sur-densité (pinceau $[2,6,Y]$ par exemple). Dans l’instantané à $z = 0$, on ne trouve pas de pinceau supplémentaire qui reproduise la triple alternance sous-densité/sur-densité avec les seuils requis.

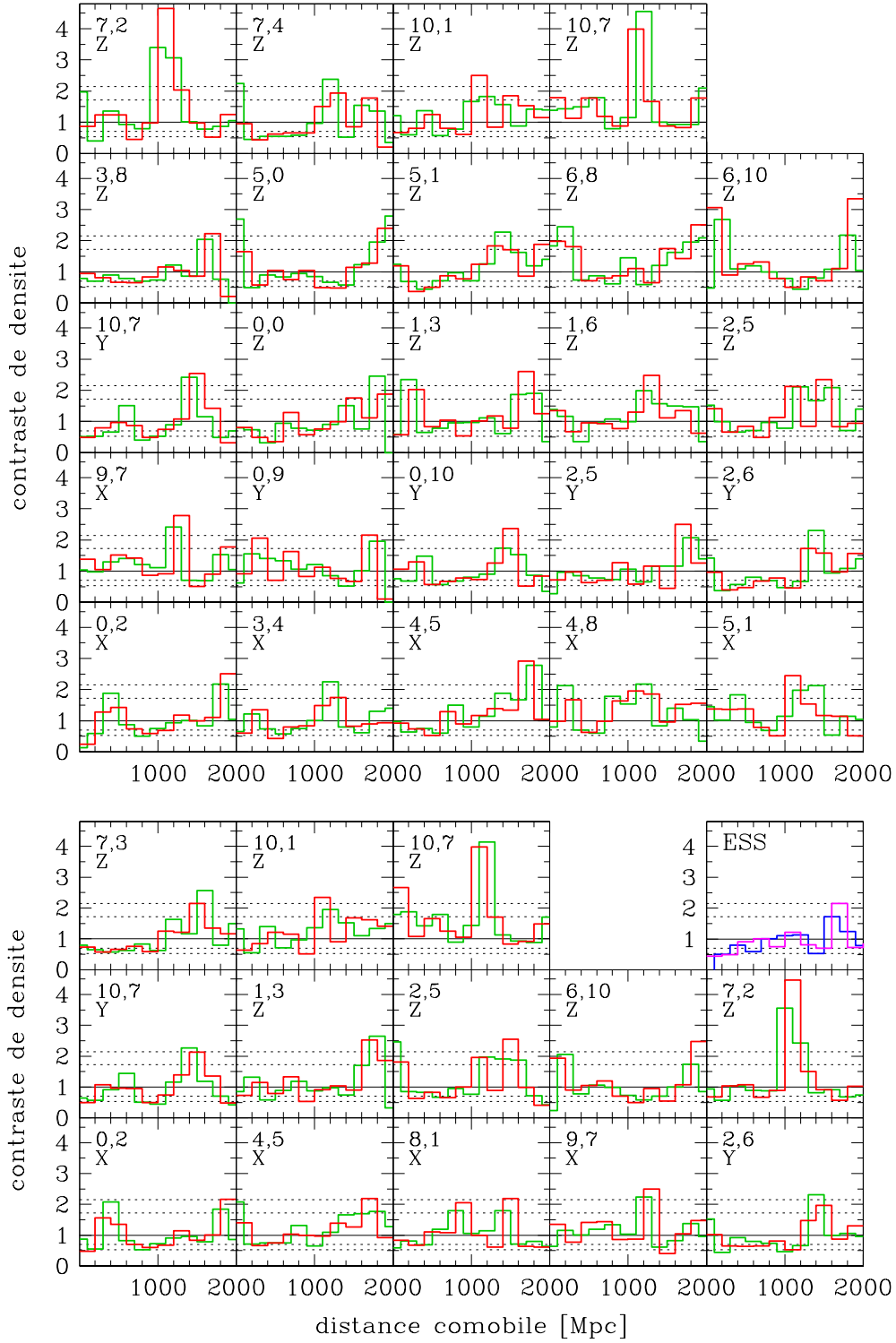


FIG. 3.7 – Distribution des contrastes de densité pour les pinceaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$ avec un pas de 100 Mpc, présentant une sur-densité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à $0.41 < z < 0.46$ dans le relevé ESO-Sculpteur (dans les histogrammes décalés). Les pinceaux sélectionnés sont extraits des instantanés à $z = 0$ (panneau du haut) et à $z = 0.509$ (panneau du bas; voir Fig. 3.8 pour la nomenclature des pinceaux). Pour comparaison, le relevé ESO-Sculpteur est inséré dans le panneau du bas.

Les Fig. 3.8 et 3.9 montrent pour les instantanés à $z = 0.509$ et $z = 0$ resp., les diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur et les différents pinceaux de la Fig. 3.7, qui contiennent une sur-densité entre 1 000 et 2 000 Mpc ; dans chaque pinceau, celle-ci est indiquée par un crochet définissant les limites correspondant aux histogrammes de la Fig. 3.7. Cette figure illustre la diversité des pinceaux obtenus, et atteste que la méthode utilisée permet de produire des échantillons dans lesquelles les grandes structures interceptées sont distinctes. On peut voir également que les sur-densités détectées correspondent parfois à plusieurs groupes, feuillets ou amas séparés par des vides, comme c'est le cas par exemple pour les pinceaux [8,1,X], [2,5,Z], [10,1,Z], et [9,7,X] (ce dernier est celui qui présente l'alternance sur-densité/sous-densité similaire en contraste aux observations). Dans d'autres pinceaux, la sur-densité est répartie sur tout l'intervalle, ressemblant plus aux données (pinceaux [2,6,Y], [10,7,Y], et [7,2,Z] par exemple).

En conclusion, la sur-densité détectée dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$ du relevé ESO-Sculpteur est rare (avec une probabilité de $\sim 4\%$), et sa juxtaposition avec la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$ en fait un système encore plus rare, que l'on ne trouve dans 1 ou 0 pinceau (si l'on tolère ou pas l'inversion le long de la ligne de visée). Cela donne une probabilité $< 1/363$, c'est-à-dire $< 0.3\%$, soit 2.75σ , ce qui est en meilleur accord avec les calculs utilisant la fonction de corrélation dans la Sect. 3.6. Le volume de la simulation étant au départ un cube de 500 Mpc de côté, on peut en déduire que ce volume est trop faible pour y rencontrer les grandes fluctuations de densité trouvées dans le relevé ESO-Sculpteur. Des simulations dans un cube plus étendu seraient ainsi nécessaires pour évaluer la probabilité d'occurrence de ces structures.

Pour information, je montre dans la Fig. 3.10 un diagramme en cône pour une tranche de déclinaison aussi fine que le relevé ESO-Sculpteur, mais s'étendant sur 90° en ascension droite. L'instantané utilisé est celui à $z = 0.509$, et la tranche contient 190 277 galaxies avec une magnitude apparente en $R < 20.5$. Comme pour les pinceaux (mais l'effet n'est pas visible à l'œil pour les petits angles), les diagrammes en cône présentés ici prennent en compte la décroissance supplémentaire en $1/(1+z)$ par rapport au calcul Euclidien de l'étendue transverse interceptée par un angle fixe sur le ciel. La Fig. 3.11, permet de faire la comparaison avec l'instantané à $z = 0$, et de voir l'évolution des grandes structures dans cet intervalle de décalage vers le rouge, sous la forme d'un accroissement du regroupement des galaxies, et d'un évidement des régions sous-denses. Ce diagramme ne contient que 129 056 galaxies, le nombre total de galaxies décroissant dans le temps à cause des fusions de galaxies. Enfin, la Fig. 3.12 montre, la distribution en distance comobile des objets dans l'instantané à $z = 0$, sans ajouter les composantes radiales des vitesses propres des galaxies. Par comparaison avec la Fig. 3.11, on peut voir que les diagrammes en décalage vers le rouge conduisent à un renforcement du contraste des structures à cause de la chute des galaxies vers les régions de haute densité que sont les amas et les feuillets de galaxies. On peut cependant voir en "plissant les yeux" que les fluctuations de densité aux échelles de ~ 100 Mpc sont invariantes d'une carte à l'autre.

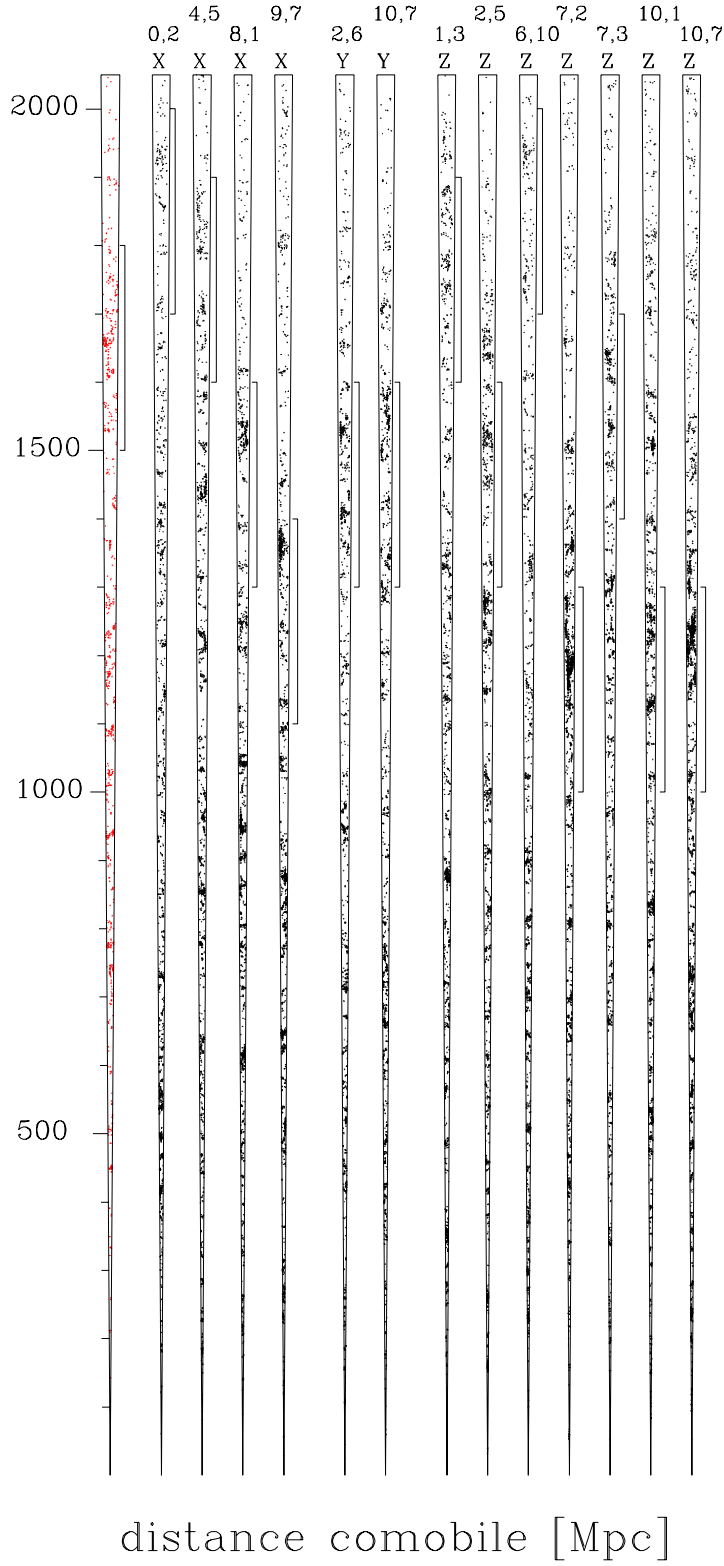


FIG. 3.8 – Diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur (à gauche et en rouge), et pour les pinceaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$, dans l’instantané à $z = 0.509$, qui présentent une sur-densité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à $0.41 < z < 0.46$ dans le relevé ESO-Sculpteur (dans les histogrammes décalés). Les chiffres et lettres indiquent les indices du pinceau sur la face d’origine, et la direction perpendiculaire à celle-ci resp.

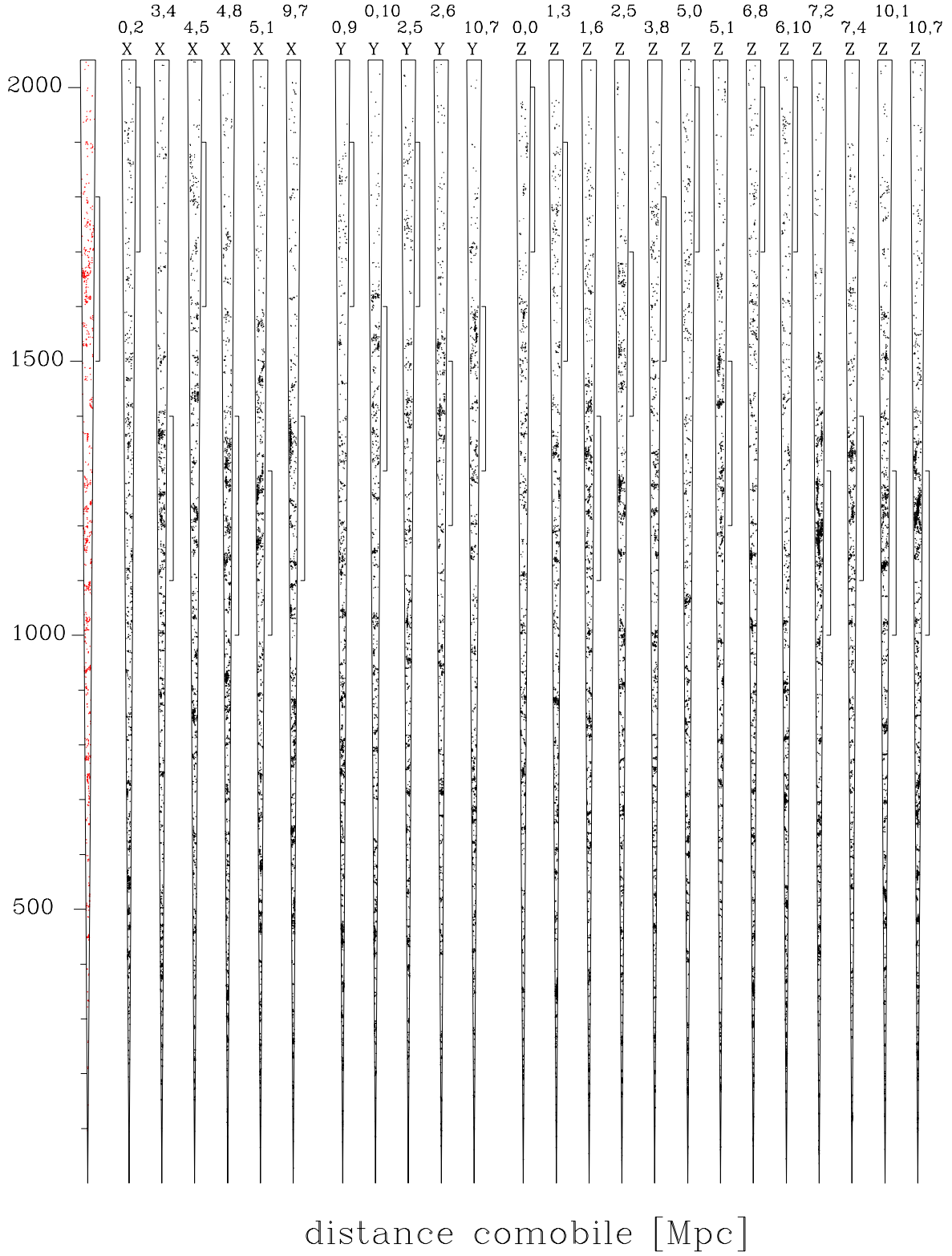


FIG. 3.9 – Diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur (à gauche et en rouge), et pour les pincesaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$, dans l’instantané à $z = 0$, qui présentent une sur-densité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à $0.41 < z < 0.46$ dans le relevé ESO-Sculpteur (dans les histogrammes décalés). Les chiffres et lettres indiquent les indices du pinceau sur la face d’origine, et la direction perpendiculaire à celle-ci resp.

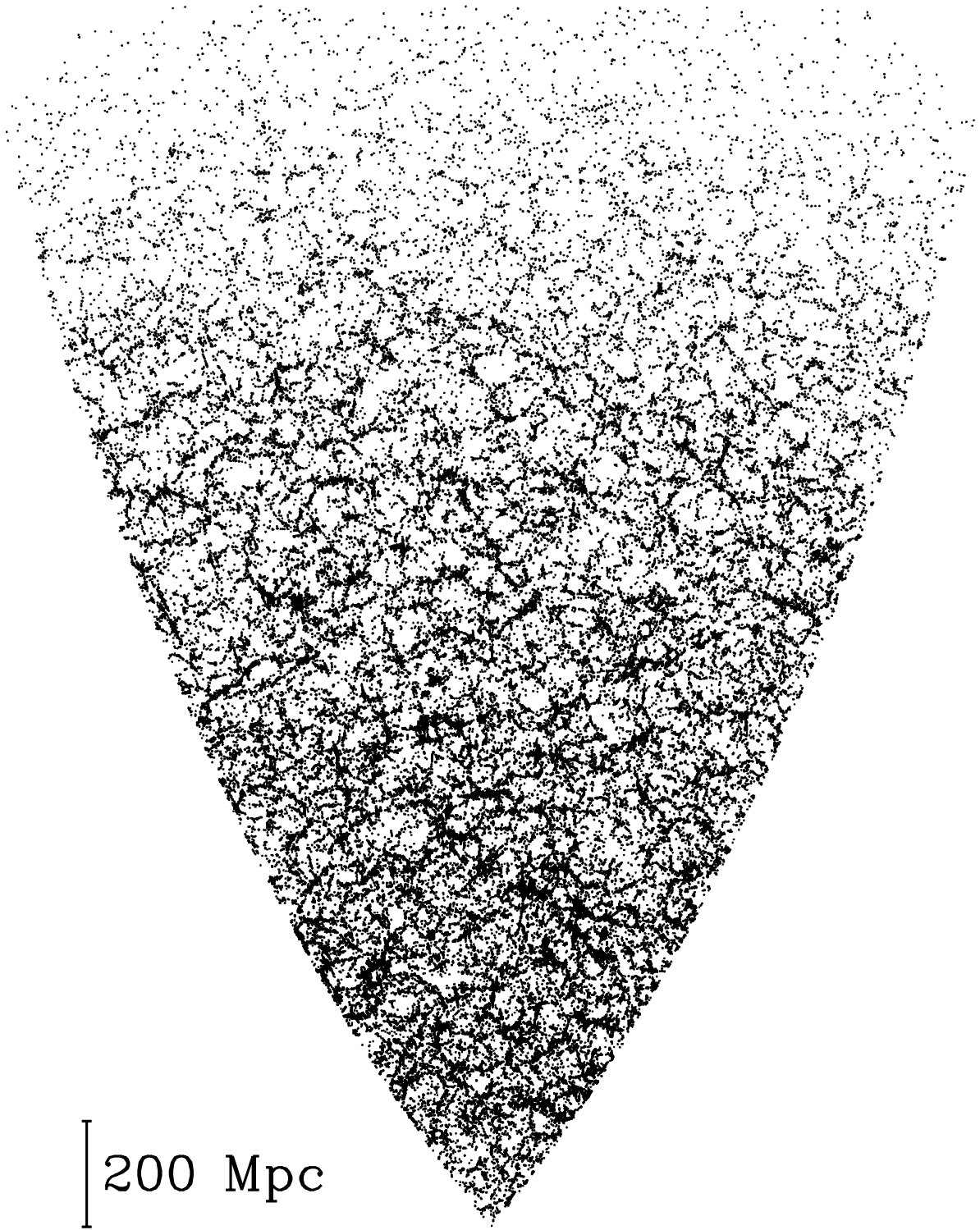


FIG. 3.10 – Diagramme en cône pour une tranche en déclinaison de même épaisseur que le relevé ESO-Sculpteur, centrée à une déclinaison de 25° , et s'étendant sur 90° en ascension droite. L'instantané à $z = 0.509$ est utilisé à toutes les distances, la distance maximale est de 2 460 Mpc, et les galaxies sont sélectionnées par une limite de 20.5 en magnitude apparente dans le filtre R.

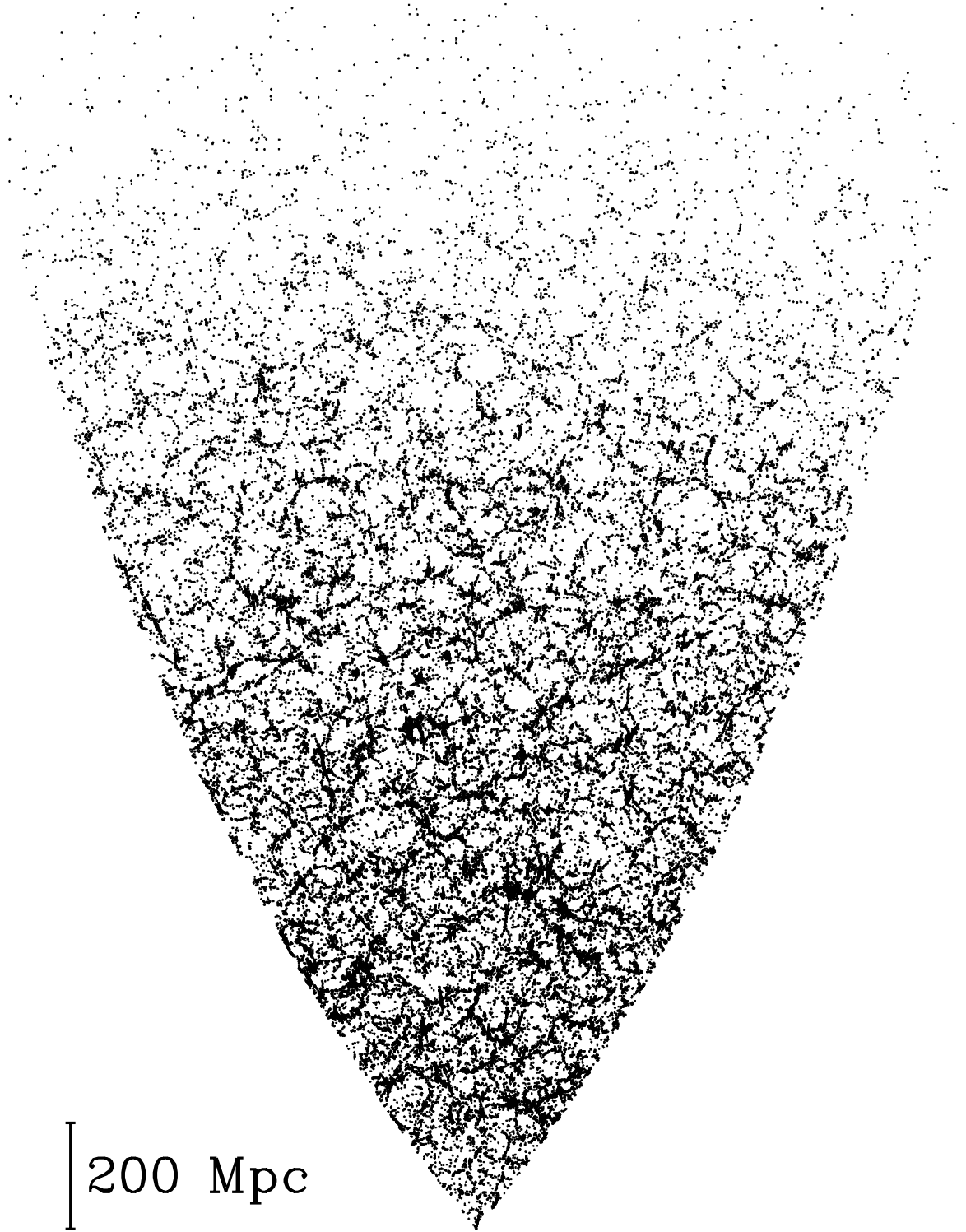


FIG. 3.11 – Même chose que dans la Fig. 3.10, mais pour l'instantané à $z = 0$ (et incluant les composantes radiales des vitesses propres des galaxies).

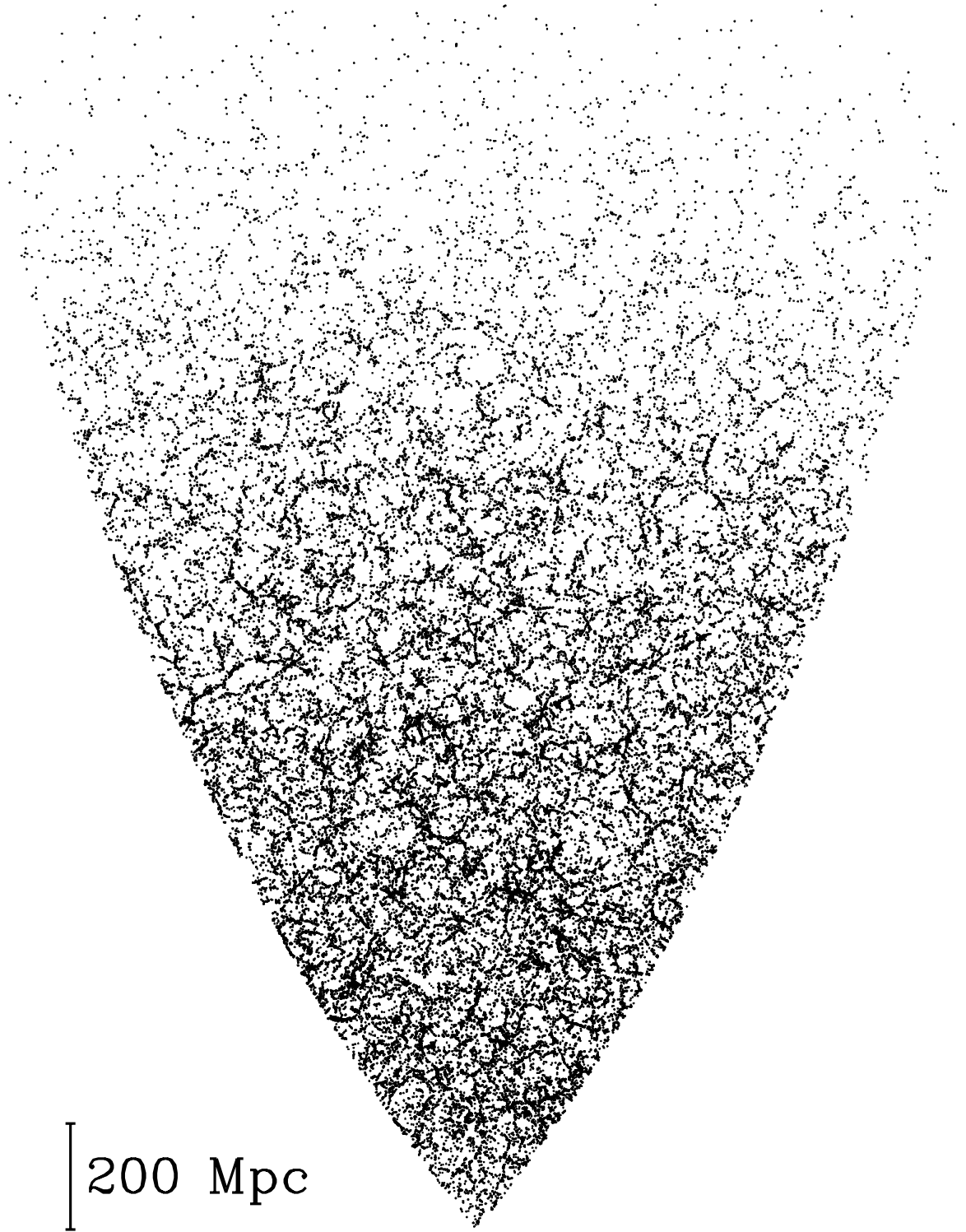


FIG. 3.12 – Même chose que dans la Fig. 3.11 pour l'instantané à $z = 0$, mais en ignorant les composantes radiales des vitesses propres des galaxies.

Chapitre 4

Décalages et types photométriques

Il est intéressant d'utiliser le logiciel ZPEG (Le Borgne & Rocca-Volmerange 2002) de mesure des décalages vers le rouge à partir de la photométrie, afin de tester les mesures de types spectraux des galaxies ESO-Sculpteur, ainsi que la détection des très grandes fluctuations de densité comme celle mise en évidence dans la Sect. 3.6.

ZPEG effectue un ajustement par moindres-carrés des spectres produits par les scénarios d'évolution des galaxies développé par PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1997, voir aussi <http://www2.iap.fr/~pegase>). A la différence d'un ajustement de spectres empiriques (Bolzonella et al. 2000; Ilbert et al. 2006; Brimiouille et al. 2008; Coupon et al. 2009), le code ZPEG présente l'intérêt de fournir non seulement une mesure du décalage spectral déduit du meilleur ajustement de spectre synthétique, mais aussi le type du scénario ajusté, et l'évolution temporelle de tous ses paramètres (taux de formation d'étoiles, masse stellaire, âge stellaire moyen etc.). On peut ainsi déduire comment serait le spectre observé une fois évolué jusqu'à $z = 0$, ou comment il serait à tout autre âge antérieur. Gabasch et al. (2004) ont montré que l'ajustement de spectres empiriques donne de bons résultats pour la mesure des décalages photométriques dans le large intervalle de décalage spectral $0.1 < z < 5$.

4.1 Comparaison des décalages spectraux

J'utilise les scénarios de tous les types disponibles dans PEGASE2 : E, S0, Sa, Sb, Sbc, Sc, Sd, Im, et Starburst. J'applique en outre la contrainte d'âge à $z = 0$: on autorise uniquement les spectres des scénarios dont l'âge est inférieur à celui de l'Univers à chaque décalage vers le rouge z (Le Borgne & Rocca-Volmerange 2002); de surcroît, les spectres des scénarios E à Sd doivent être âgés d'au moins 11 milliards d'années au temps présent ($z = 0$), et ceux des Im d'au moins 9 milliards d'années. Ces valeurs de 11 et 9 milliards d'années sont les âges à $z = 0$ d'une galaxie qui se serait formée à $z = 2.6$ et $z = 1.4$ resp., impliquant des z de formation plus élevés. En revanche, les scénarios de Starburst peuvent être arbitrairement jeunes à $z = 0$, et donc à toutes les valeurs de z . Sachant que le z maximal mesuré pour le relevé est de 0.883, je borne les mesures à $z < 1$, et j'utilise un pas en décalage spectral de 0.001 (du même ordre de grandeur que la précision des mesures spectroscopiques). J'ai effectué des essais en introduisant la possibilité d'une extinction interne maximale de 0.02 mag et 0.04 mag. Cela introduit des dégénérescences et n'améliore par la mesure des décalages spectraux, donc cette option n'est pas utilisée dans les résultats décrits ci-dessous.

La Fig. 4.1 montre les décalages spectraux photométriques z_{phot} obtenus en utilisant la photométrie B_J V_J et R_c des galaxies du relevé ESO-Sculpteur ayant par ailleurs une mesure de décalage spectral spectroscopique z_{spec} . On observe une grande dispersion $\sigma_z \simeq 0.16$, où σ_z est défini comme $\sigma(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$, avec des dégénérescences pour $z_{\text{spec}} \sim 0.42$, et des effets systématiques pour $z_{\text{spec}} < 0.2$.

Une partie de la dispersion et des effets systématiques dans le panneau de gauche de la Fig. 4.1 peuvent être réduits en améliorant la précision de la photométrie optique. Pour simuler de plus faibles incertitudes sur les magnitudes dans les bandes B_J V_J et R_c pour l'échantillon spectroscopique des

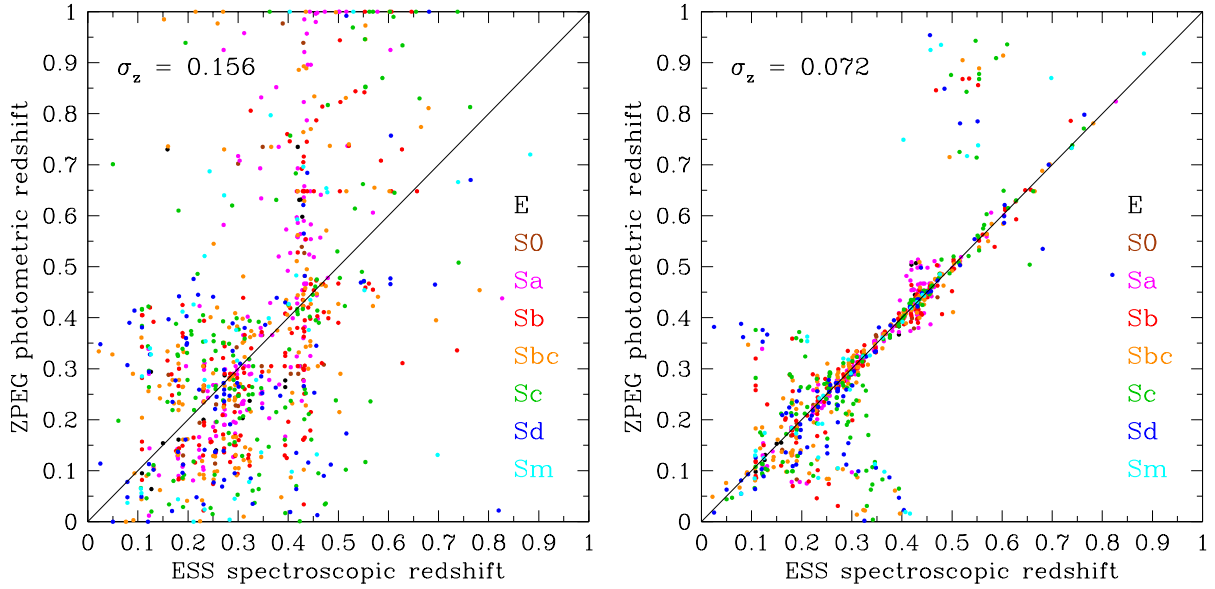


FIG. 4.1 – *A gauche, comparaison des décalages photométriques obtenus par ZPEG en utilisant la photométrie $B_J V_J$ et R_c et les décalages spectroscopiques des galaxies du relevé ESO-Sculpteur. Les types spectraux (voir Sect. 2.4) sont indiqués par des couleurs différentes. A droite, on utilise la photométrie $B_J V_J$ et R_c synthétique “parfaite” générée par ZPEG au moyen des décalages spectroscopiques, et on introduit une incertitude Gaussienne avec un écart-type de 0.01 sur les magnitudes.*

galaxies ESO-Sculpteur, j'utilise la photométrie calculée par ZPEG lorsqu'on effectue les ajustements des scénarios PEGASE en utilisant les décalages spectroscopiques effectivement mesurés, que l'on appelle ici “photométrie idéale”. J'ajoute ensuite un bruit aléatoire Gaussien d'écart-type σ_{mag} choisi. Le panneau de droite montre la comparaison des z_{phot} avec les z_{spec} obtenue avec $\sigma_{\text{mag}} = 0.01$ mag. : la dispersion globale se réduit à $\sigma_z = 0.07$. On observe cependant une persistance de dégénérescences à $z_{\text{spec}} \lesssim 0.3$ et à $z_{\text{spec}} \gtrsim 0.5$, affectant de préférence les galaxies de type spectral Sbc et plus tardives. Pour une partie des galaxies situées dans l'intervalle $0.35 \lesssim z_{\text{spec}} \lesssim 0.6$, la dispersion est même plus faible, $\sigma_z = 0.02$, indiquant que lorsqu'on dispose uniquement de la photométrie optique, il y a une fenêtre $0.35 < z < 0.6$ dans laquelle on peut obtenir des décalages photométriques de bonne précision. Enfin, on remarque que pour reproduire statistiquement le diagramme du panneau de gauche de la Fig. 4.1, je dois introduire des incertitudes $\sigma = 0.07$ mag. sur la photométrie idéale, soit un peu plus que les incertitudes estimées des observations (0.05 mag.).

Les divers effets systématiques sur les z_{phot} observés dans la Fig. 4.1 sont symptomatiques des limites de l'utilisation de la photométrie optique, qui contraint trop faiblement les vieilles populations stellaires des galaxies, car elle est sensible aux sursauts de formation d'étoiles, alors que ce sont les vieilles populations d'étoiles qui fournissent pour une galaxie un âge fiable et évoluant temporellement de façon monotone. Pour illustrer ces effets, j'ai complété la photométrie observée dans les bandes optiques du relevé spectroscopique ESO-Sculpteur par la photométrie synthétique “parfaite” calculée par ZPEG dans les bandes infrarouges proches I_c et JHK (filtres du relevé 2MASS Skrutskie 2001); la photométrie infrarouge est dispersée au moyen d'une Gaussienne d'écart-type $\sigma_{\text{mag}} = 0.05$ mag.

Dans le panneau de gauche de la Fig. 4.2, on constate que l'ajout de l'infrarouge proche réduit considérablement la dispersion ainsi que les effets systématiques dans les valeurs de z_{phot} . La dispersion sur les écarts de décalage vers le rouge devient $\sigma_z = 0.05$, soit le tiers de la valeur lorsqu'on utilise uniquement la photométrie optique, et proche des incertitudes sur les magnitudes (ou des incertitudes relatives sur les flux, car $\sigma(f)/f \simeq 0.4 \ln 10 \simeq 0.92 \sigma_{\text{mag}}$). Dans le panneau de droite de la Fig. 4.2, je simule l'effet d'une diminution des incertitudes sur la photométrie optique et infrarouge proche à 0.01 mag.. Il en résulte une dispersion $\sigma_z/(1+z) = 0.008$ sur les écarts entre les décalages photométriques

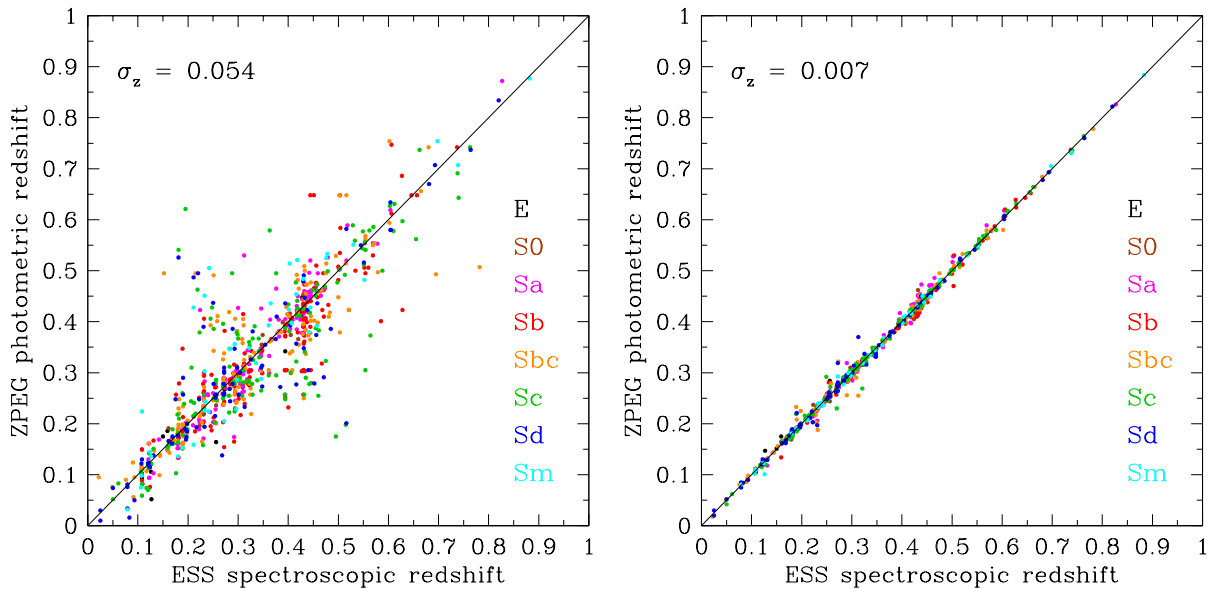


FIG. 4.2 – *A gauche, comparaison des décalages photométriques calculés par ZPEG en utilisant la photométrie B_J V_J et R_c observée et la photométrie infrarouge I_cJHK synthétique “parfaite” calculée par ZPEG dans laquelle des incertitudes Gaussiennes de 0.05 mag. sont introduites. A droite, on utilise la photométrie synthétique “parfaite” dans les bandes optique et infrarouges dans laquelle sont introduites des incertitudes de 0.01 mag. dans chaque bande.*

et spectroscopique, soit une valeur à nouveau similaire aux incertitudes sur les magnitudes.

4.2 Comparaison des types spectraux

Par ailleurs, je compare la classification spectrale du relevé ESO-Sculpteur avec celle fournie par ZPEG. On rappelle que les types spectraux furent obtenus par projection des spectres de Kennicutt (1992) dans l’espace des composantes spectrales principales des spectres (voir Sect. 2.4). Ici, l’ajustement par moindres carrés des scénarios des différents types du modèle PEGASE fournit, lorsqu’on utilise la valeur mesurée du décalage vers le rouge “spectroscopique”, le meilleur ajustement de spectre synthétique, et par conséquent le type spectral au sein du modèle. Le panneau de gauche de la Fig. 4.3 montre les types ZPEG ainsi obtenus (et notés “types spectrophotométriques”) en comparaison avec les types spectraux provenant.

On observe dans ce graphique une grande dispersion de la mesure des types, en particulier pour les types spectraux Sbc et Sc, même si leur type ZPEG moyen est proche du type spectral, comme indiqué par la ligne pointillée. En outre, des déviations systématiques sont visibles dans les valeurs moyennes, les plus marquantes apparaissant pour les types spectraux Sa et Sb : les types ZPEG de ces objets sont plus précoces. On remarque aussi une forte asymétrie (rendu visible par un décalage important entre les courbes des types ZPEG moyens et médians) pour les types spectraux Sc, Sd et Sm, qui s’accompagne d’un étalement des types ZPEG jusqu’aux types spiraux les plus précoces (Sa). Cela implique que les distributions d’énergie spectrale obtenues par la photométrie du relevé ESO-Sculpteur sont plus rouges, et plus bleues que celles obtenues par spectroscopie pour les galaxies de types Sa-Sb, et Sc-Sd resp.

Le panneau de droite de la Fig. 4.3 montre que lorsque l’on n’utilise pas la connaissance des décalages vers le rouge spectroscopiques pour l’ajustement par ZPEG, on obtient des types spectro-photométriques un peu plus dispersés, et avec des déviations systématiques plus importantes, notamment pour les types spectraux Sa, Sb et Sbc. Mais l’effet dominant demeure la différence entre les distributions en énergie spectrale obtenues par la photométrie et la spectroscopie, comme le montre la comparaison avec le panneau

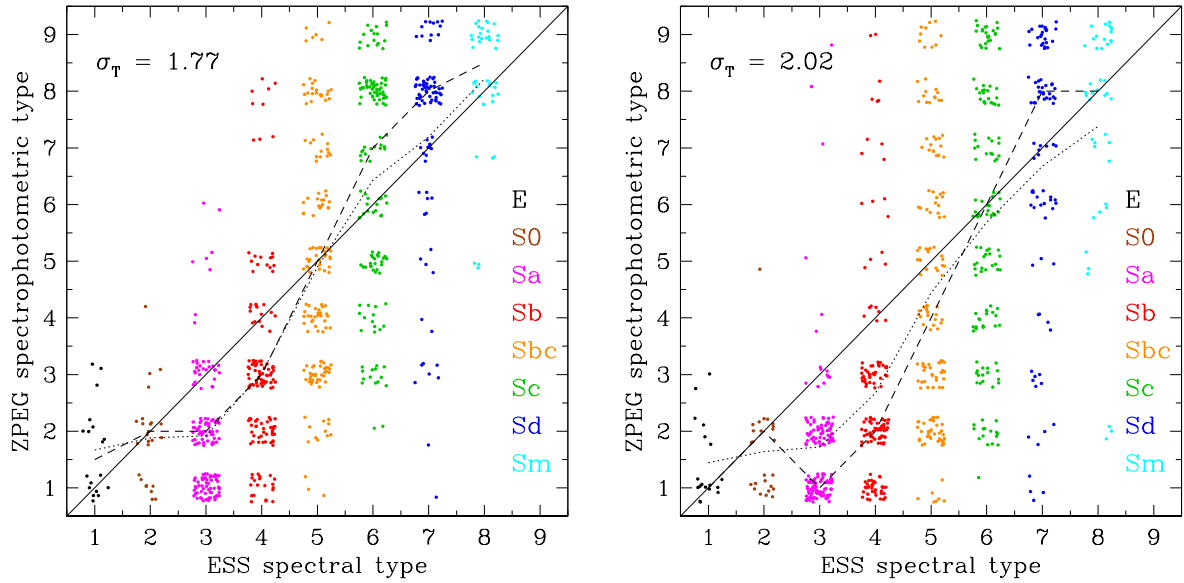


FIG. 4.3 – A gauche, la comparaison des types spectraux du relevé ESO-Sculpteur (notés ESS) avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie B_J V_J et R_c et des décalages spectraux spectroscopiques. A droite, la même chose en n'utilisant pas la connaissance a priori des décalages spectroscopiques. Dans les deux panneaux, la ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types spectral, et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points.

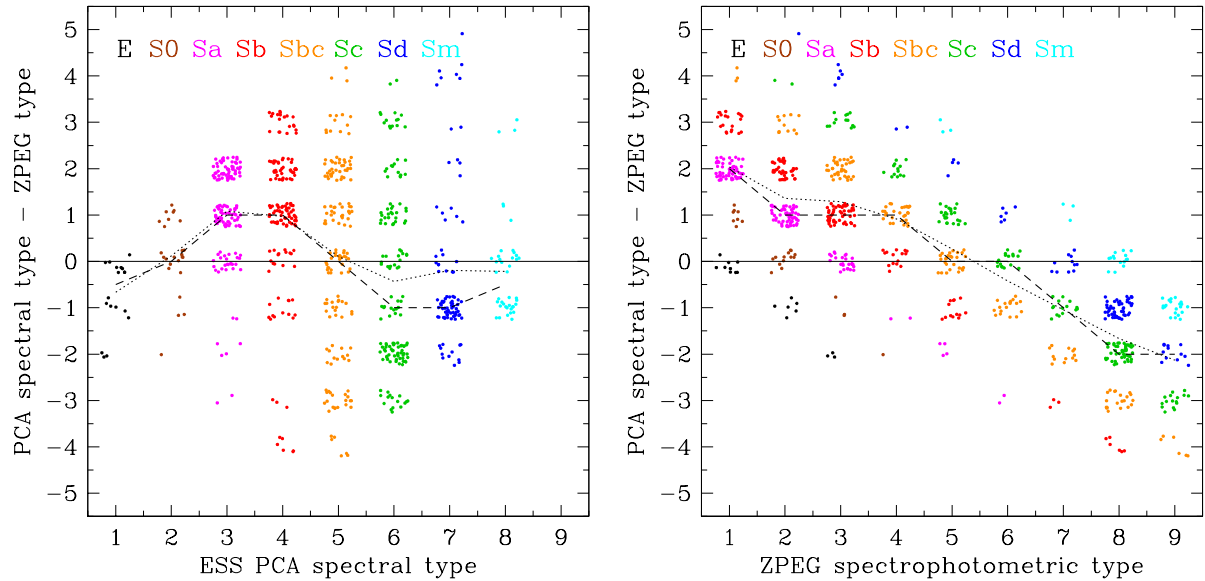


FIG. 4.4 – La différence entre le type spectral du relevé ESO-Sculpteur (noté ESS), et le type spectro-photométrique dérivé avec ZPEG à partir de la photométrie B_J V_J et R_c et des décalages vers le rouge spectroscopiques, en fonction, à gauche, du type spectral, et à droite, du type ZPEG. Dans les deux panneaux, la ligne pointillée montre la moyenne des différences de types, pour chaque type (spectral ou spectro-photométrique), et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points.

de gauche.

Les origines de ces différences sont diverses. D'une part, la dispersion et les effets systématiques sur la calibration en flux des spectres de fentes intervient. En outre, on montre dans la Sect. 3.3 de la Partie II que l'orientation variable des galaxies conduit à un rougissement et donc à une dispersion importantes des types spectro-photométriques avec un rougissement des distributions en énergie spectrale. Ces effets affectent forcément la spectroscopie de fente des objets, qui souffre de surcroît de biais d'ouverture : les objets ayant des composantes de bulbe et de disque aux couleurs (et donc spectres) différents, auront des spectres variables selon l'orientation de la fente par rapport au grand axe de la galaxie.

Nous avons vu dans la Sect. 2.4 qu'il y a un rougissement des couleurs synthétiques calculées à partir des spectres par rapport à la photométrie *BVR* du relevé (en partie expliqué par le défaut de sensibilité des CCD dans le bleu, en partie par la réfraction atmosphérique différentielle). Un rougissement des spectres devrait conduire à des types spectraux plus précoces, donc inversement on s'attend à ce que les types spectro-photométrique par ZPEG soient plus tardifs que les types spectraux. On observe cela uniquement pour les types tardifs. Pour les types précoces, l'effet est inversé.

La différence entre les deux classifications (spectrale et spectro-photométrique) est montrée dans la Fig. 4.4, en fonction de l'une ou l'autre classification (selon le panneau). L'effet systématique le plus marqué se produit lorsqu'on examine la différence de type en fonction du type spectro-photométrique de ZPEG, avec une dépendance presque linéaire entre la différence moyenne de type et le type ZPEG. Il est possible qu'un décalage entre les échelles de classification spectrale et spectro-photométrique conduise à des valeurs de différence de classe alternativement positives et négatives. Une véritable interprétation me semble cependant difficile sans avoir recours à des simulations, illustrant la complexité des divers biais intervenant dans une classification spectrale.

4.3 Effets dus à l'orientation des fentes

Nous avons vu dans la Sect. 2.4 que les effets de réfraction différentielle peuvent expliquer que les couleurs synthétiques calculées à partir des spectres soient plus rouges que la photométrie *BVR* du relevé. L'on doit aussi prendre en compte les biais d'ouverture résultant de la spectroscopie de fente pour le relevé ESO-Sculpteur. Celle-ci fut obtenue en centrant des fentes longues de 1.2 à 1.8 seconde d'arc de large sur les objets. Comme les fentes échantillonnent une proportion plus faible des parties externes d'une galaxie, on peut s'attendre à ce que les gradients de couleur des galaxies affectent la spectroscopie. Ceux-ci se matérialisent par des couleurs plus bleues de quelques dixièmes de magnitude en allant vers l'extérieur des galaxies (voir aussi Sect. 3.5 de la Partie III), et pour tous les types de galaxies (Segalovitz 1975; Boroson & Thompson 1987; Vigroux et al. 1988; Balcells & Peletier 1994). Cet effet va aussi dans le sens d'un rougissement des spectres de fentes, et par conséquent à une classification plus précoce des spectres par rapport aux distributions d'énergie spectrale intégrées sur tout le profil des objets.

Un effet de second ordre est celui de l'orientation de chaque fente par rapport au grand axe de la galaxie observée. Pour examiner si un tel effet existe dans le relevé ESO-Sculpteur, j'ai utilisé SExtractor et le paramètre "THETAWIN_J2000" pour mesurer l'angle de position du grand axe des ellipses ajustées au profil isophotal des objets, dans les 3 filtres B_J , V_J et R_c du relevé. Les mesures en B_J étant affectées par un niveau de bruit important, je ne les prends pas en compte dans cette analyse. J'ai ensuite comparé cet angle avec l'angle d'orientation des fentes que j'avais stocké dans la base de données, et j'en ai déduit un angle relatif entre le grand axe et la fente compris entre -90° et 90° . Le panneau de gauche de la Fig. 4.5 indique un bon accord entre les mesures d'angle des grands axes pour un même objet dans les filtres V_J et R_c .

La Fig. 4.6 montre pour trois intervalles de la différence entre l'angle de la fente (noté θ_{slit}) et l'angle du grand axe des galaxies (noté PA_{gal}), la fraction de galaxies réparties selon trois intervalles de différence entre le type spectral et le type spectro-photométrique. On montre les résultats dans les filtres R_c et V_J , et pour la moitié brillante et faible de chaque échantillon. Chaque histogramme montré contient entre 70 et 150 galaxies, et les barres d'erreur ne prennent en compte que l'incertitude de Poisson liées à ces nombres d'objets. Par ailleurs, on ne considère dans les graphes que les galaxies ayant un rapport d'axe $b/a \leq 0.9$, car les angles d'orientation des galaxies avec des rapports d'axes proches de l'unité sont affectés par de

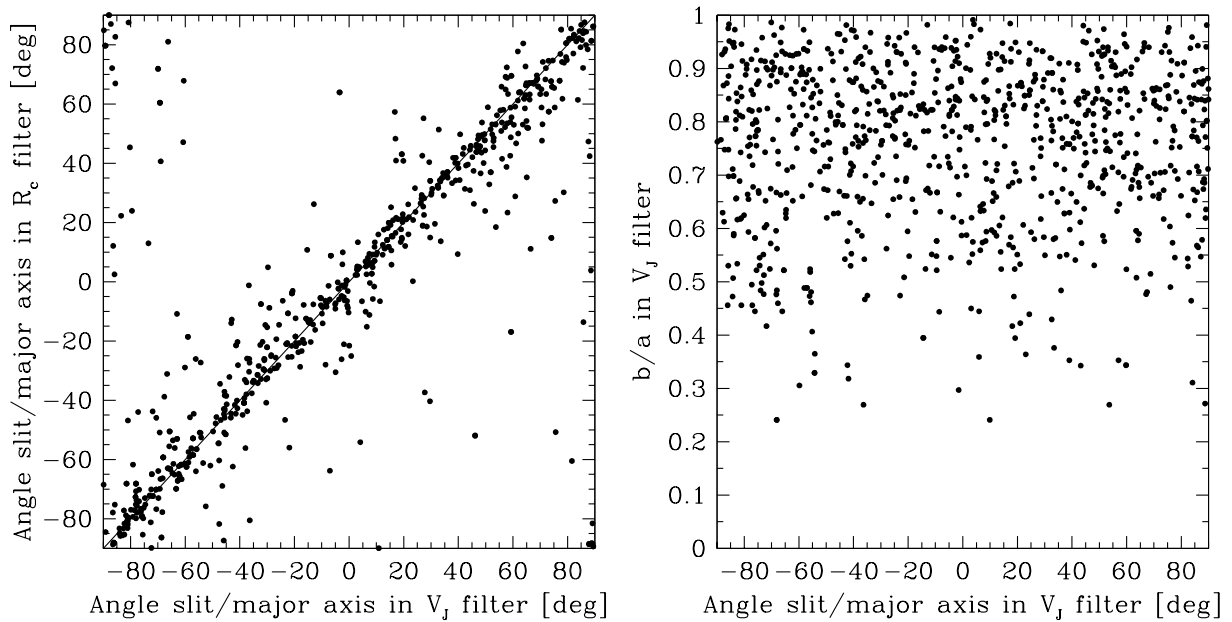


FIG. 4.5 – *A gauche : comparaison des angles relatifs entre le grand axes des galaxies et la fente utilisée pour la spectroscopie. A droite : distribution des rapports d'axes en fonction de l'angle relatifs entre le grand axes des galaxies et la fente utilisée pour la spectroscopie.*

grandes incertitudes, et n'ont pas d'intérêt dans l'analyse effectuée ici. On constate cependant dans le panneau de droite de la Fig. 4.5, qu'un grand éventail de rapports d'axes b/a et d'angles entre la fente et le grand axe des objets sont disponibles pour le relevé ESO-Sculpteur.

On remarque dans les panneaux de gauche de la Fig. 4.6 un effet à 2σ concernant les sous-échantillons de galaxies brillantes, c'est à dire les plus grandes angulairement : les fentes orientées perpendiculairement au grand axe des galaxies observées (à $\pm 30^\circ$) conduisent préférentiellement à un type spectral plus tardif, c'est-à-dire plus bleu, alors qu'il y a un déficit d'objets dans ce même intervalle d'écart de type lorsque les fentes sont alignées avec le grand axe (à $\pm 30^\circ$). J'interprète cet effet comme un résultat lié aux gradients de couleur, mais affectant préférentiellement les galaxies spirales : pour une galaxie spirale inclinée, une fente placée perpendiculairement au grand axe échantillonnera une fraction comparativement plus faible du bulbe et plus grande du disque, qu'une fente alignée avec le grand axe. Le disque étant plus bleu que les bulbes (voir Sect. 3.5 de la Partie II), il en résulte un type spectral plus tardif. On ne peut malheureusement pas examiner l'effet pour les galaxies spirales uniquement, la statistique étant trop faible.

Cet effet est présent dans les deux filtres R_c et V_J (avec un effet plus marqué en R_c), attestant d'un signal réel. En revanche, l'effet n'est pas présent dans les intervalles de magnitude plus faible, et ceci à nouveau dans les deux filtres R_c et V_J . Les galaxies de magnitude $\gtrsim 20 - 21$ sont ainsi trop petites angulairement pour être affectés par ces biais d'ouverture.

Cette analyse fournit une illustration supplémentaire des biais mettant en jeu la cohérence dans la détermination des types spectraux des galaxies lointaines. On montre dans la Sect. 3.4 de la Partie II que selon le mode de séparation par type spectral utilisé, on obtient des fonctions de luminosité variables, et toutes distinctes des fonctions génériques par type morphologique.

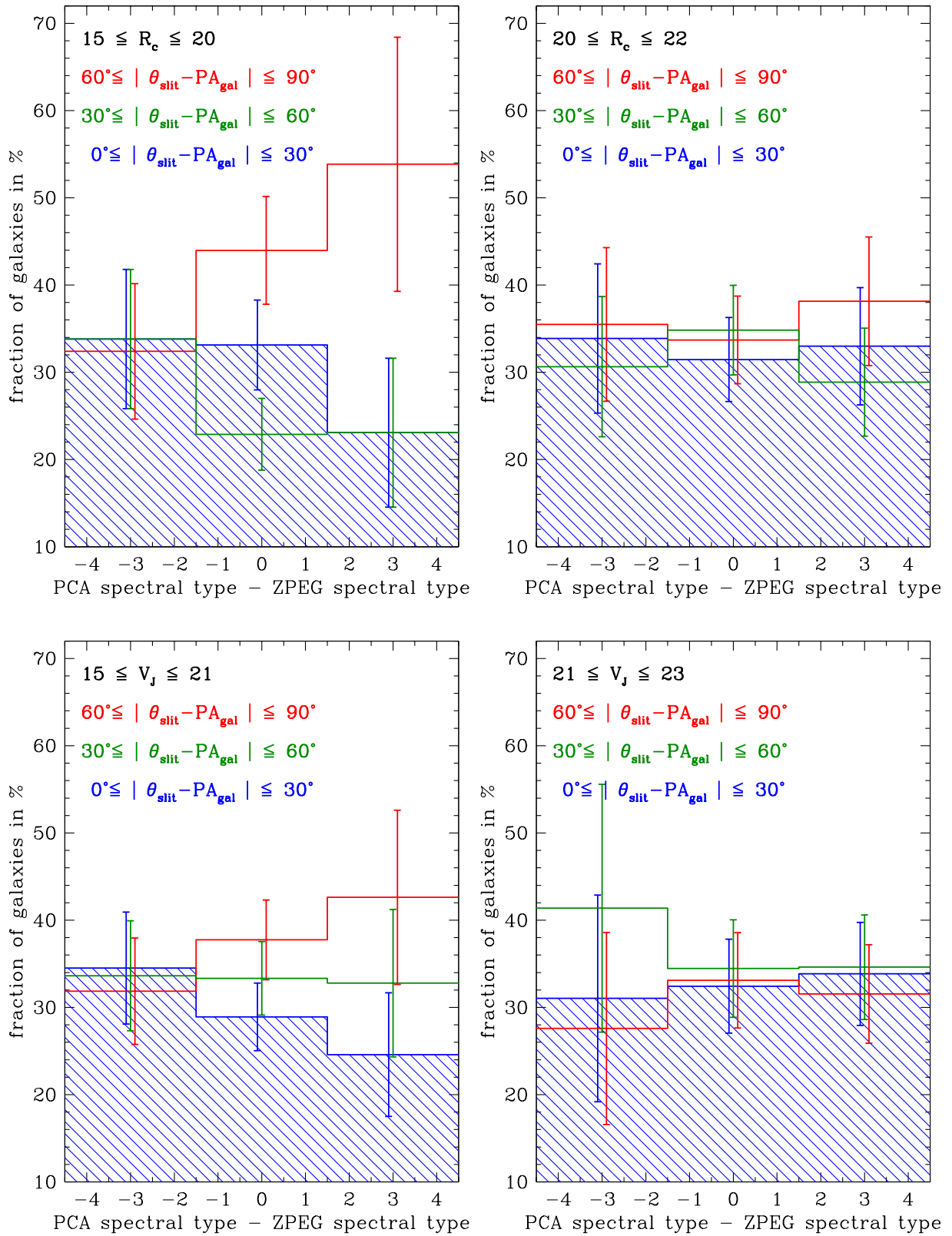


FIG. 4.6 – La fraction des galaxies du relevé ESO-Sculpteur observées en spectroscopie avec différentes orientations de fente (θ_{slit}) relativement au grand axe de l'objet (PA_{gal}), ceci en fonction de la différence entre les types spectraux et spectro-photométrique. En haut, en utilisant les orientations des galaxies dans le filtre R_c en bas, dans le filtre V_J . A gauche on examine environ la moitié des galaxies les plus brillantes de l'échantillon, à droite la moitié la plus faible.

4.4 Détection des fluctuations à très grande échelle

Enfin, nous examinons l’impact des incertitudes dans la mesure des décalages vers le rouge “photométrique” sur la détection des grandes structures telles que la sur-densité discutée dans la Sect. 3.6. Les incertitudes externes sur le décalage spectroscopique pour le relevé ESO-Sculpteur furent évaluées à $\sigma_z = 0.00055$, et correspondent à une incertitude de 2.3 Mpc en distance comobile, qui est en outre comparable à l’épaisseur des feuillets (de Lapparent et al. 1991, les dispersion de vitesse aléatoire dans les feuillets sont également du même ordre de grandeur). Cette bonne précision sur les mesures de z_{spec} permet par conséquent une détection aisée des vides, pour lesquels un diamètre moyen de ~ 33 Mpc fut mesuré par de Lapparent & Slezak (2007) au moyen d’un periodogramme de la distribution des objets le long de la ligne-de-visée. On peut se demander ce qu’il en est lorsqu’on dégrade la précision des décalages vers le rouge selon les valeurs plus importantes obtenues pour les décalage “photométriques” dans la Sect. 4.1.

La Fig. 4.7 montre dans la partie basse, les distributions en ascension droite et décalage spectral pour le relevé ESO-Sculpteur et pour les diverses simulations de photométrie optique synthétique “parfaite” calculées par ZPEG et dispersée comme décrit dans la Sect. 4.1. Dans la Fig. 4.8, on utilise en plus la photométrie infrarouge synthétique “parfaite”. Dans la partie supérieure des deux graphes, on montre pour chaque distribution en ascension droite et décalage spectral de la partie inférieure l’histogramme en décalage spectral avec des incréments de 0.05 (soit ~ 200 Mpc). La distribution des points et l’histogramme en noir des deux figures correspondent aux décalages vers le rouge obtenus par les observations spectroscopiques du relevé et mettent en évidence le pic marqué de la sur-densité dans l’intervalle $0.41 < z < 0.46$.

La distribution des points et l’histogramme en magenta dans les Figs. 4.7 et 4.8 utilisent en revanche les décalages photométriques obtenus lorsqu’on utilise la photométrie optique observée. Dans ce cas, la sur-densité est complètement effacée par l’imprécision sur les décalages $\sigma_z \simeq 0.16$. Elle réapparaît avec l’utilisation de la photométrie optique “parfaite” lorsque la dispersion sur les magnitudes est $\sigma_{\text{mag}} < 0.01$ (points et courbe en vert). On obtient une plus grande robustesse vis-à-vis de l’incertitude sur la photométrie lorsqu’on complète la photométrie optique avec la photométrie infrarouge. La Fig. 4.8 montre qu’avec $\sigma_{\text{mag}} < 0.05$, la sur-densité est toujours visible, que ce soit dans la distribution des points en ascension droite et décalage vers le rouge que dans l’histogramme (points et courbes en orange); on rappelle que l’imprécision sur les décalages décroît alors à $\sigma_z \simeq 0.05$ (voir Fig. 4.2).

A noter que dans les deux Figs. 4.7 et 4.8, l’existence d’un pic de densité à $z \lesssim 0.3$ dans le relevé spectroscopique est maintenu lorsque la dispersion sur les magnitudes augmente, à cause des dégénérescences dans la détermination des z_{phot} (voir panneau de droite de la Fig. 4.1, et panneau de gauche de la Fig. 4.2). On remarque en outre que l’extension en décalage spectral $\Delta z \simeq 0.5$ des très grandes fluctuations de densité mises en évidence (Sect. 3.6), est supérieure d’au moins un facteur 10 à la précision sur la précision des décalages vers le rouge nécessaires à leur détection : $\sigma_z \simeq 0.007$ avec l’infrarouge proche, et $\sigma_z \simeq 0.07$ avec l’optique uniquement, résultant d’une dispersion en magnitude $\sigma_{\text{mag}} = 0.05$ et $\sigma_{\text{mag}} = 0.01$ resp. (voir Sect. 4.1). D’où la nécessité des simulations réalistes présentées ci-dessus.

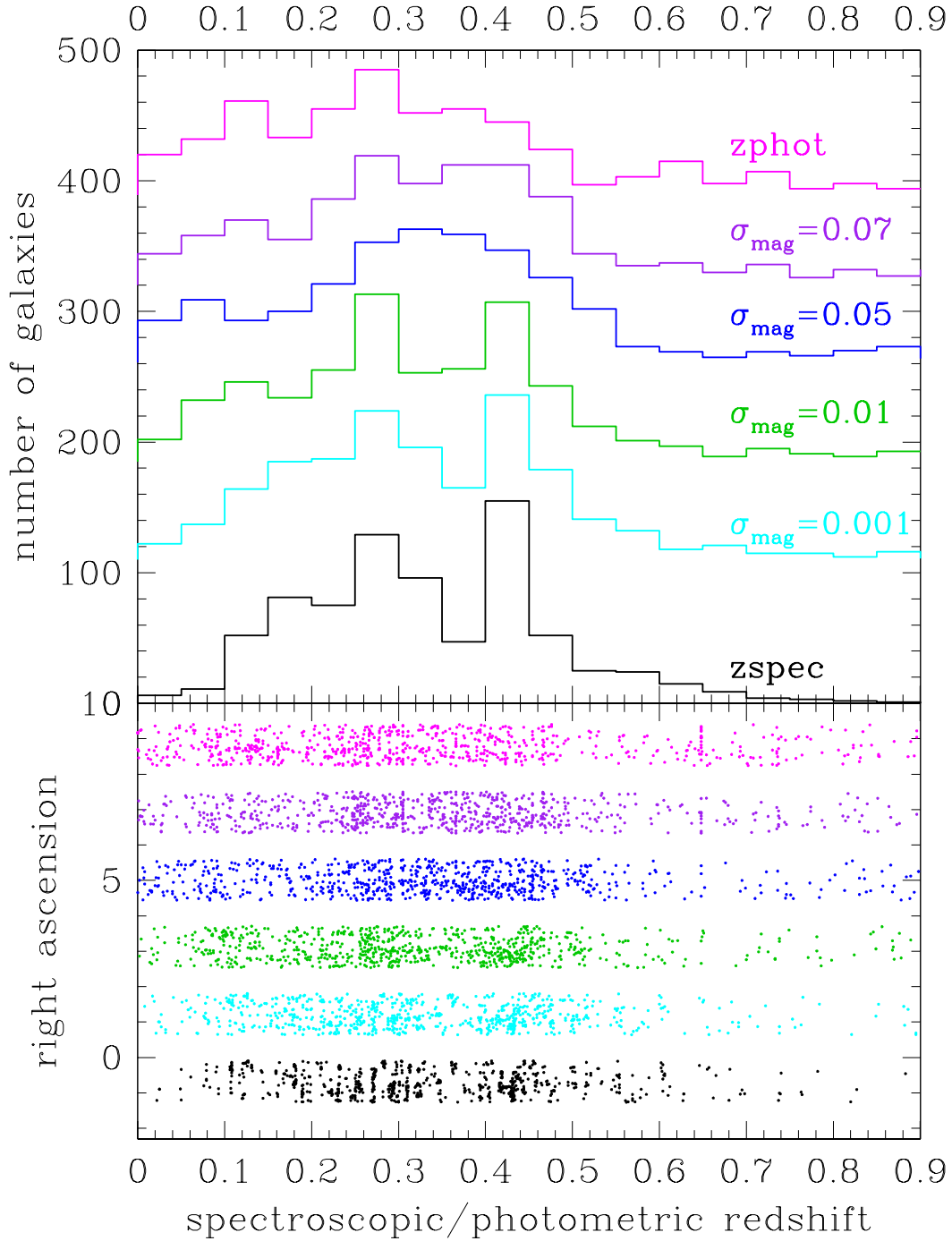


FIG. 4.7 – Cette figure montre en bas la répartition en ascension droite et décalage spectral de différents échantillons de galaxies obtenus à partir du relevé ESO-Sculpteur, en haut, les histogrammes des distributions en décalage spectral correspondants. La distribution en noir est celle observée dans le relevé spectroscopique ESO-Sculpteur. La distribution du haut (en magenta) est celle des décalages photométriques déduits de la photométrie optique du relevé. Les autres courbes sont obtenues en introduisant dans la photométrie optique synthétique “parfaite” (déduite par ZPEG en utilisant les décalages spectroscopiques) une dispersion Gaussienne des magnitudes d’écart-type σ_{mag} .

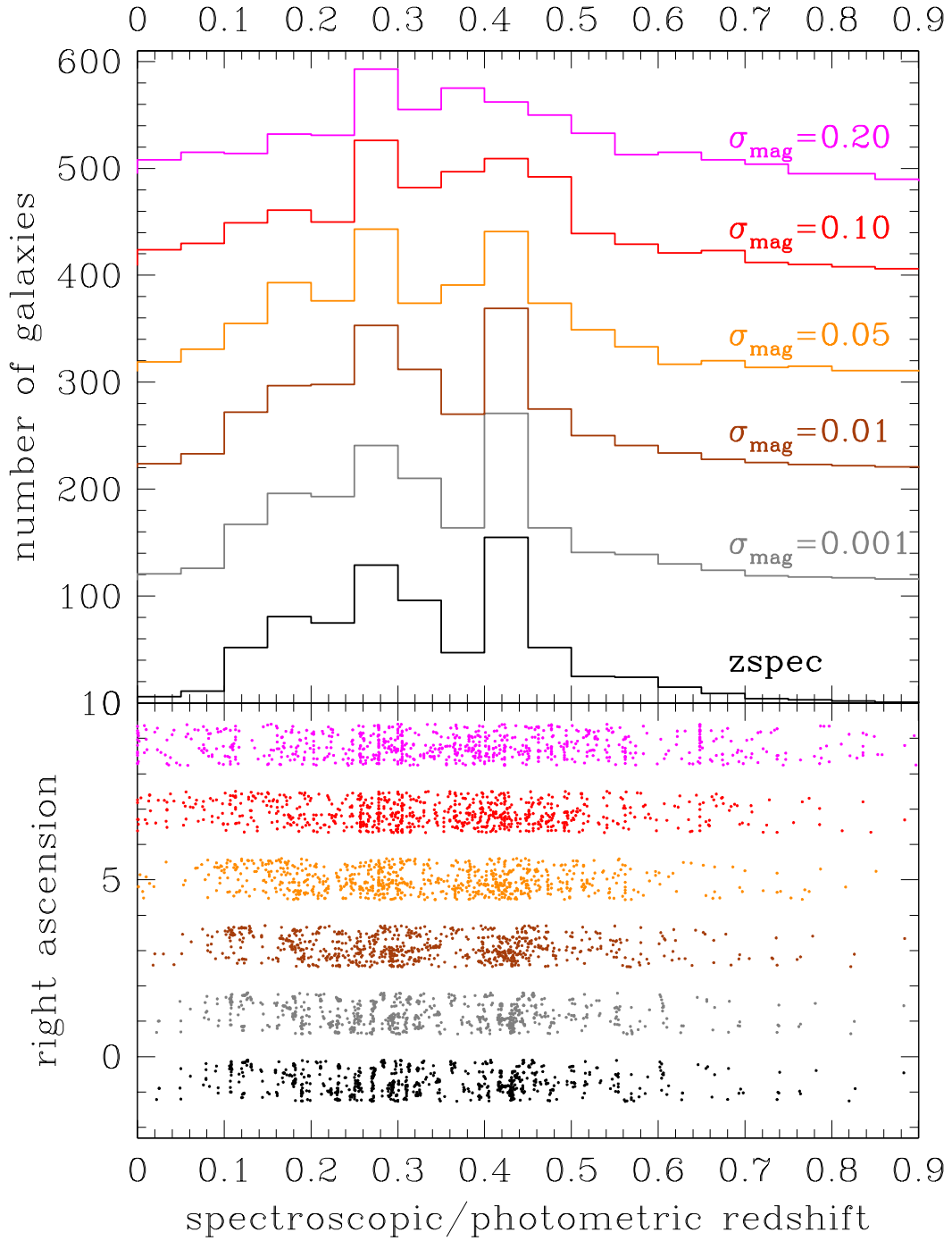


FIG. 4.8 – Même chose que dans la Fig. 4.7, en utilisant la photométrie optique et infrarouge synthétique “parfaite” pour les distributions autre qu’en noir. Une dispersion Gaussienne est introduite dans les magnitudes optiques et infrarouge d’écart-type σ_{mag} .

Chapitre 5

Fonctions de luminosité et évolution

5.1 Introduction

Dans les modèles de formation de l'Univers à grande échelle basés sur l'effondrement gravitationnel des structures, les fonctions de luminosité des galaxies offrent un outil quantitatif pour contraindre les processus majeurs entrant en jeu dans la formation des galaxies (Cole et al. 2000; Baugh et al. 2002). La fonction de masse des galaxies est une prédiction de base des modèles théoriques et contraint la fonction de luminosité moyennant des hypothèses sur le rapport masse-luminosité des galaxies (Ashman et al. 1993). Les phénomènes de refroidissement et d'éjection du gaz jouent aussi un rôle dans la prédiction théorique des fonctions de luminosité (Scannapieco & Broadhurst 2001). Les fonctions de luminosité permettent en outre de contraindre la formation d'étoiles et sa régulation (Perez-Gonzalez et al. 2003; Peng et al. 2010), ainsi que les processus de fusions des galaxies (Wake et al. 2006).

Si les simulations à N-corps décrivent un intervalle limité de mass et de types de galaxies, les observations révèlent une grande richesse de détails, avec une fonction de luminosité des galaxies s'étendant sur 12 magnitudes, soit 5 ordres de grandeur en luminosité (Mathis et al. 2002; Flint et al. 2001; Trentham & Tully 2002). Les relevés systématiques de galaxies indiquent un comportement en loi de Schechter (1976) pour la plupart des mesures, avec des variations de la magnitude caractéristique et de la pente aux faibles magnitudes selon le type de galaxies considérées (Efsthathiou et al. 1988; Loveday et al. 1992; Heyl et al. 1997; Lin et al. 1999; Folkes et al. 1999; Fried et al. 2001; Madgwick et al. 2002; Wolf et al. 2003; Montero-Dorta & Prada 2009).

Pourtant, les mesures locales des fonctions de luminosité dans l'amas de la Vierge, du Centaure, du Fornax et de Coma (Sandage et al. 1985; Jerjen & Tammann 1997a; Ferguson & Sandage 1991; Andreon 1998), ont montré un comportement distinct pour les différents types morphologiques de galaxies, avec des fonctions Gaussiennes pour les galaxies géantes, et des fonctions croissantes à faibles magnitudes pour les galaxies naines. Des modèles théoriques peuvent prédire ce comportement bimodal (Schaeffer & Silk 1988). Les variations de la fonction globale peuvent alors être attribués 'a des variation dans le rapport du nombre de galaxies géantes et naines, mais des échantillons statistiques couvrant de grands volumes du l'Univers, et non pas concentrés sur un groupe ou amas particulier sont nécessaires, avec de surcroît une mesure fiable des types morphologiques des différents objets.

5.2 Collaborateurs

- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au TCFH, en détachement du Lab. d’Astrophysique de Marseille),
- Sandro Bardelli (Obs. de Bologne, Italie),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l’Univ. Pontificia Católica, Chili),

5.3 Fonctions de luminosité par classe spectrale

Article: “The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts 0.1-0.5”, de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S., 2003, *A&A* 404, pp. 831-860.

Grâce à la classification spectrale objective des galaxies du relevé ESO-Sculpteur, nous avons pu mesurer les fonctions de luminosité par type spectral (de Lapparent et al. 2003). Le catalogue est scindé en 3 classes spectrales, correspondant aux 3 regroupements de types morphologiques suivants: E + S0 + Sa, Sb + Sc + dE, Sc + Sd/Sm + dI. Ainsi, les galaxies géantes (elliptiques, lenticulaires, et spirales) occupent les 3 classes spectrales, tandis que les deux types de galaxies naines (dE, dI), mises en évidence pour la première fois dans un relevé systématique à $z \sim 0.5$, sont réparties entre les deux classes spectrales dominées par les galaxies spirales “tardives”.

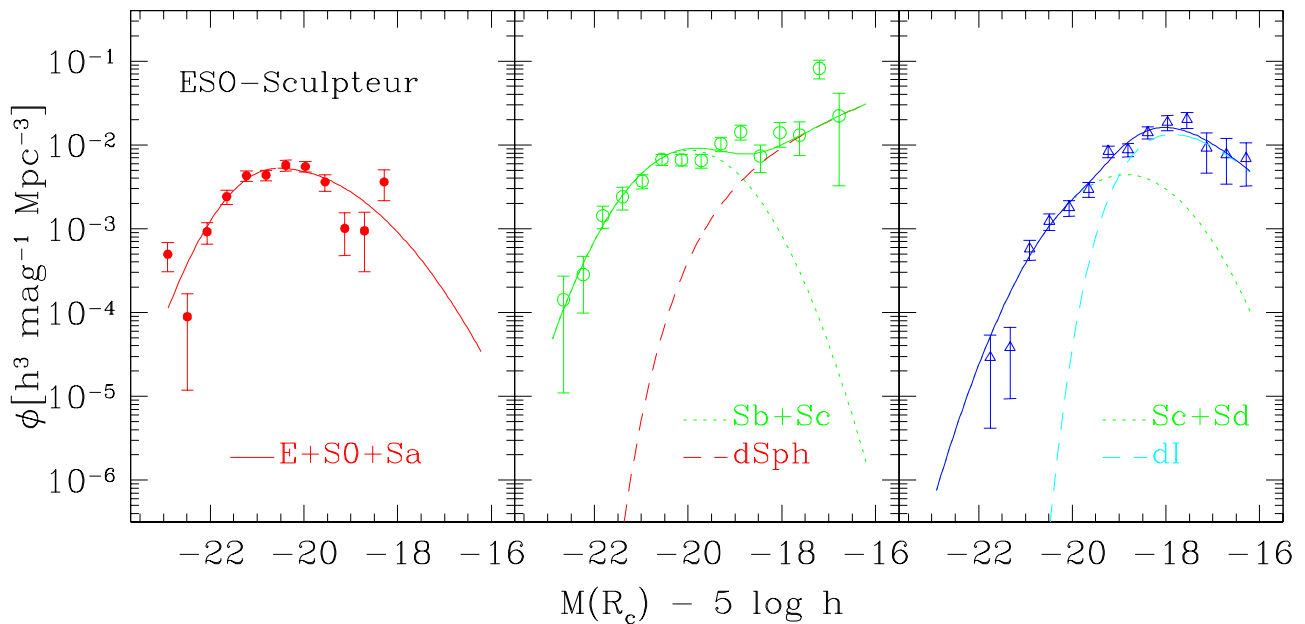


FIG. 5.1 – Les fonctions de luminosité par classe spectrale du relevé ESO-Sculpteur à $R_c \leq 21.5$ et $0.1 < z < 0.6$ (symboles) sont ajustées au moyen de fonctions composites (lignes continues) basées sur les fonctions de luminosité spécifiques à chaque type de galaxie.

Les fonctions de luminosité des 3 classes spectrales, montrées dans la Fig. 5.1, diffèrent significativement les unes des autres, et nous proposons une nouvelle approche pour interpréter ces résultats. Nous montrons que l’on peut obtenir de bons ajustements des fonctions de luminosité du relevé ESO-Sculpteur par classe spectrale au moyen de sommes de fonctions Gaussiennes pour les galaxies géantes, et de fonctions de de Schechter (1976) pour les galaxies naines (décroissance exponentielle aux magnitudes brillantes, et croissance en loi de puissance aux faibles luminosités). Ces ajustements, montrés dans la Fig. 5.1, conduisent à une réconciliation avec les fonctions de luminosité spécifiques à chaque type

morphologique mesurées dans l'Univers local, indiquées dans la Fig. 5.2. De surcroît, les paramètres des composantes géantes et naines des fonctions de luminosité du relevé ESO-Sculpteur sont en bon accord avec les mesures locales pour chaque type de galaxie (Sandage et al. 1985; Jerjen & Tammann 1997a; Ferguson & Sandage 1991).

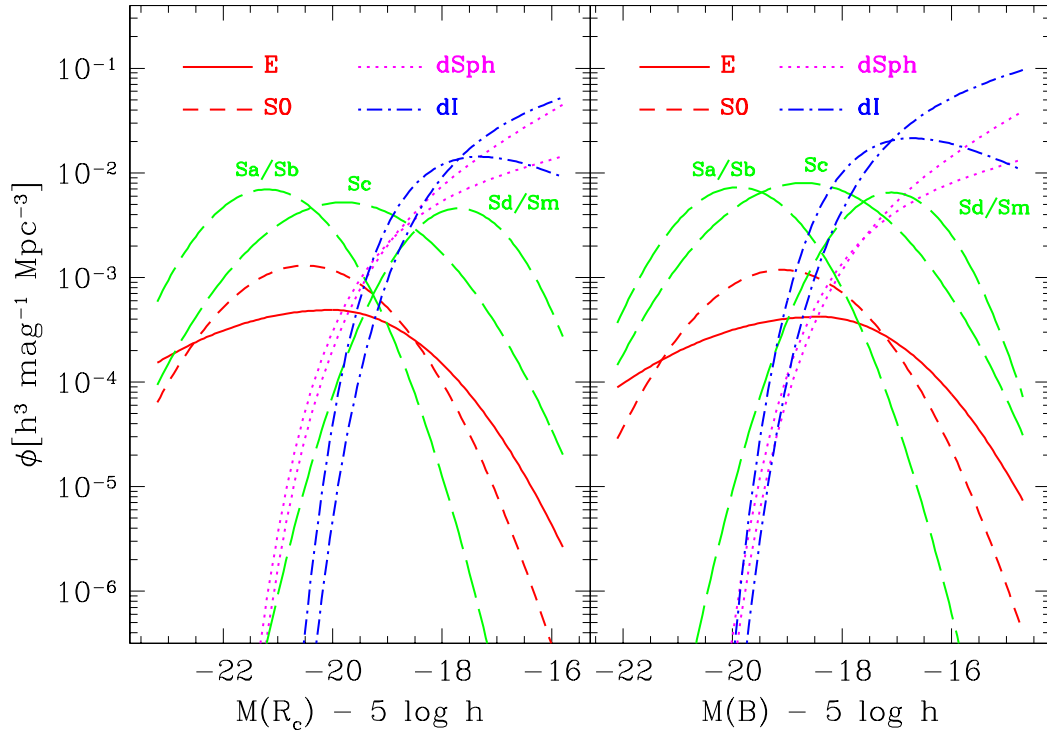


FIG. 5.2 – Les fonctions de luminosité par type morphologique (Sandage et al. 1985; Jerjen & Tammann 1997b) converties dans les bandes B et R_c , avec recalage des amplitudes sur le relevé ESO-Sculpteur. Ces courbes illustrent les contributions relatives de chaque classe morphologique à la fonction de luminosité des galaxies.

5.4 Article choisi n° 4

“The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts 0.1-0.5”

de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 404, pp. 831-860

2003

5.5 Biais dans les fonctions de luminosité par type

Article: “Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift surveys” de Lapparent, V., 2003, *A&A* 408, pp. 845-872.

Afin de replacer dans un contexte plus large les nouvelles mesures de fonctions de luminosité que nous avons obtenues avec le relevé ESO-Sculpteur, j’ai effectué une revue exhaustive de toutes les mesures de fonctions de luminosité par classe de galaxie obtenues dans les relevés avec connaissance des décalages vers le rouge (de Lapparent 2003). Ces fonctions sont toutes de type Schechter, avec des magnitudes caractéristiques et des pentes variables selon les relevés et le mode de sélection par type. Par comparaison avec les fonctions de luminosité spécifiques à chaque type morphologique mesurées localement (voir Fig. 5.2), cette analyse suggère qu’une grande partie des mesures de fonctions de luminosité sont affectées par un mélange de types morphologiques. Cette confusion gêne la comparaison des fonctions de luminosité entre les différents relevés.

Fait notable, aucun relevé existant ne mesure la fonction de luminosité des galaxies spirales : ces mesures sont suspectées d’être contaminées par la présence de galaxies naines elliptiques (voir Sect. 5.3); nous confirmons cette présomption dans la Sect. 3.4 au moyen du catalogue morphologique EFIGI). En outre, la plupart des relevés utilisant une identification visuelle de la morphologie des objets à partir de plaques photographiques échouent dans la mesure des fonctions de luminosité Gaussiennes pour les galaxies elliptiques et lenticulaires. Cette analyse souligne la nécessité de mesures séparées des fonctions de luminosité des différents types de galaxies géantes et naines au delà de l’Univers local, et pour de grands échantillons statistiques. L’échantillon EFIGI, décrit dans le deuxième volet de ce mémoire, fournit un premier échantillon permettant de telles mesures (voir Sect. 3.4).

5.6 Article choisi n° 5

“Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift surveys”

de Lapparent, V.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 408, pp. 845-872

2003

5.7 Evolution des galaxies spirales tardives

Article: “The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1-0.”, de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S. 2004, *A&A* 422, pp. 841–863.

Le relevé ESO-Sculpteur a ensuite permis de préciser la nature de l’excès de galaxies dans les comptages profonds de galaxies, et plus particulièrement dans les bandes bleues (Tyson 1988; Lilly et al. 1991; Metcalfe et al. 1995; Campos & Shanks 1997). Ces nouvelles données exhibent une croissance rapide de la densité spatiale de galaxies Sc + Sd + dI avec le décalage spectral, montrée dans le panneau de gauche de la Fig. 5.3 (de Lapparent et al. 2004), que l’on peut modéliser en $(1+z)^2$. Cette mesure fut validée par les 2 excellentes prédictions qui en résultent : (1) l’ajustement des distributions en décalage vers le rouge du relevé ESO-Sculpteur jusqu’à $z \simeq 0.5$, dans le panneau de droite de la Fig. 5.3 ; (2) l’ajustement des comptages BVR_c extrapolés jusqu’à la limite du catalogue photométrique de l’ESO-Sculpteur, 3 magnitudes plus profond que le sondage spectroscopique, soit jusqu’à $z \simeq 1.0$, montré dans la Fig. 5.4.

L’évolution détectée pourrait être causée par une croissance rapide du nombre de galaxies lorsque le décalage spectral augmente, ce qui indiquerait que les fusions de galaxies ont joué un rôle dans l’évolution récente des galaxies de type spiral tardif et naine irrégulière. Une autre interprétation possible est une augmentation de luminosité de l’ordre de ~ 1 magnitude à $z \sim 0.5$ et de $\sim 1.5 - 2.0$ à $z \sim 1$. Cette dernière interprétation est compatible avec l’accroissement de luminosité prédit par les modèles d’évolution spectro-photométrique des galaxies Sc aux décalages considérés (Poggianti 1997). Enfin, la combinaison d’une évolution en nombre *et* en luminosité ne peut pas être écartée.

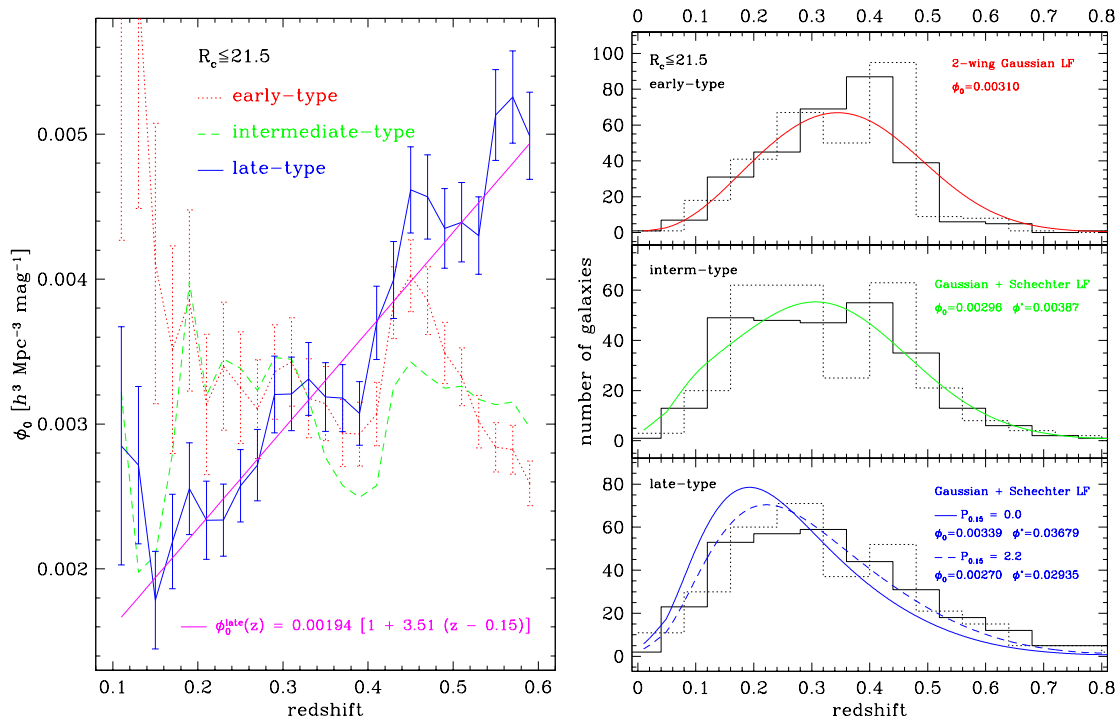


FIG. 5.3 – A gauche, la croissance rapide de la densité de galaxies de type spectral tardif (Sc + Sd/Sm + dI) dans le relevé ESO-Sculpteur. A droite, l’ajustement des distributions en décalage spectral dans la bande R_c pour les 3 classes spectrales (type précoce [E, S0, Sa], type intermédiaire [Sb, Sc, dE], et type tardif [Sc, Sd/Sm, dI]), par les fonctions de luminosité composites de la Fig. 5.1 (sans évolution, lignes continues), et avec prise en compte de l’évolution des galaxies de type tardif (ligne pointillée).

Cette analyse illustre l’importance d’utiliser des fonctions de luminosité réalistes pour chaque type de galaxie lorsque l’on souhaite mesurer leur évolution. Nous avons constaté que l’utilisation de fonctions

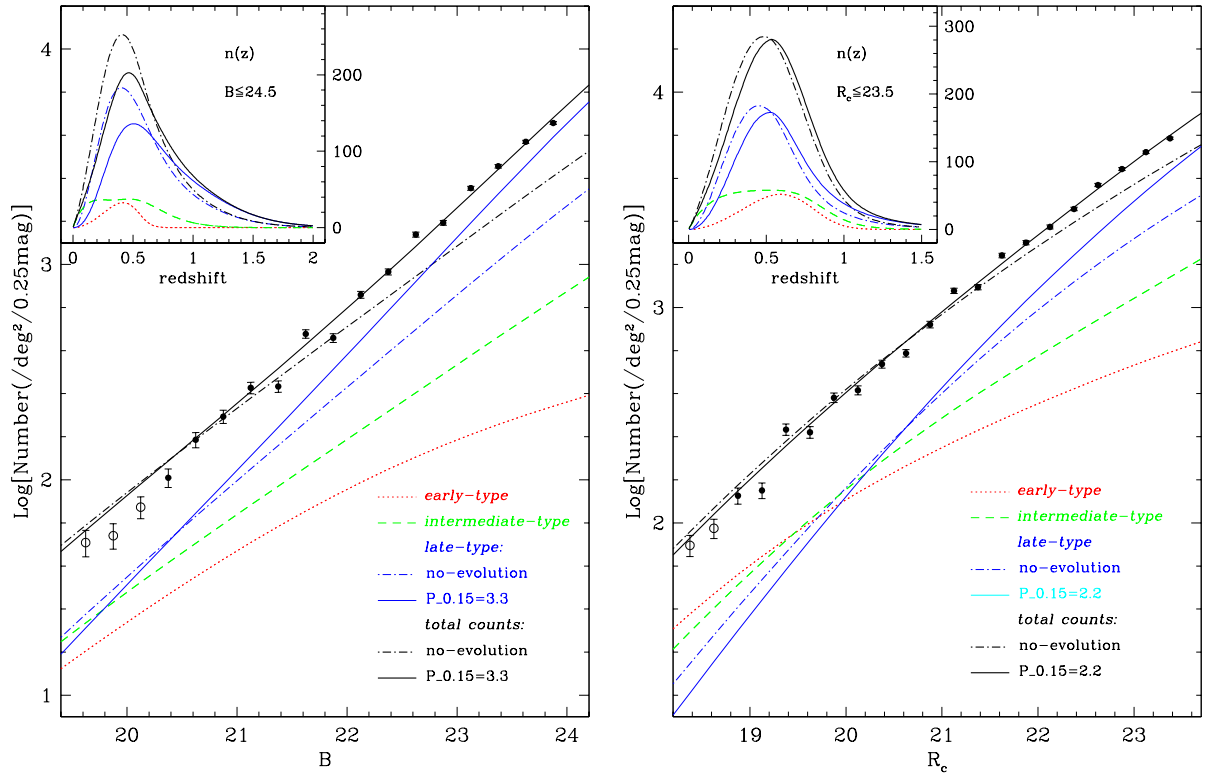


FIG. 5.4 – Ajustement des comptages du relevé ESO-Sculpteur dans les bandes B (à gauche) et R_c (à droite) par les fonctions de luminosité composites de la Fig. 5.1 (sans évolution, lignes tiretées/pointillées), et avec prise en compte de l'évolution des galaxies de type tardif (lignes continues).

de luminosité de Schechter obtenus pour les classes spectrales, rendent difficile l'ajustement simultané des distributions en redshifts et des comptages profonds, et l'évolution qui en est déduite est affectée par de plus grandes dégénérescences et barres d'erreur.

5.8 Article choisi n° 6

“The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1-0.”

de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 422, pp. 841–863

2004

Chapitre 6

Suivi en infrarouge-moyen avec ISO

6.1 Introduction

L’observation des galaxies dans l’infrarouge offre une opportunité unique d’étudier le processus de formation d’étoiles via le chauffage des poussières (Sanders & Mirabel 1996). Ces dernières étant le résultat des éjections stellaires, l’infrarouge fournit un diagnostic complémentaire, celui de la formation d’étoiles passée. Des preuves d’une évolution marquée furent fournies par des observations dans l’infrarouge moyen avec le satellite *ISO* (Pozzi et al. 2004), puis avec *Spitzer* (Papovich et al. 2004; Dole et al. 2004; Le Floc’h et al. 2005; Rodighiero et al. 2010). L’extension à l’infrarouge lointain et au domaine sub-millimétrique suggère une évolution rapide des sources infrarouges entre $z = 0$ et $z \simeq 1$ (Lagache et al. 2003; Magnelli et al. 2009), et l’existence d’une population de galaxies très lumineuses avec un pic d’activité à $z \simeq 2$ (Franceschini et al. 2010). La modélisation des flux et des distributions de comptages dans les différentes bandes apportent des informations sur la nature des sources et leur mode d’évolution (Xu et al. 2001; Sajina et al. 2006; Popescu et al. 2011). Les mesure du rayonnement de fond dans l’infrarouge apportent de surcroît des contraintes fortes sur l’histoire de la formation d’étoiles des galaxies émettant dans l’infrarouge (Lagache et al. 2005; Le Borgne et al. 2009; Jauzac et al. 2011). Les observations récentes dans l’infrarouge lointain avec le satellite *Herschel* apportent de nouvelles contraintes sur l’évolution des sources produisant le fond diffus (Berta et al. 2010).

6.2 Collaborateurs

- Brigitte Rocca-Volmerange (IAP)
- Nick Seymour (post-doctorant à l’IAP au moment de la collaboration, actuellement au Mullard Space Science Laboratory, Univ. College London, Royaume-Uni)
- Michel Fioc (IAP)

6.3 Catalogue à $12\mu\text{m}$

Article: “A $12\mu\text{m}$ ISOCAM survey of the ESO-Sculptor field. Data reduction and analysis”, Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent**, V., 2007, *A&A* 475, pp. 791-799.

Par son taux de complétude élevé et la séparation fine des différents types de galaxies, le relevé ESO-Sculpteur constitue une base de donnée intéressante pour des suivis observationnels dans d’autres domaines de longueur d’onde. Nous avons observé avec *ISOCAM* la région du champ ESO-Sculpteur la moins affectée par les cirrus galactiques, avec le filtre LW10 qui couvre la bande passante $\simeq 12\pm 3.5\mu\text{m}$, et fut conçu pour mimer la bande à $12\mu\text{m}$ d’*IRAS*. Nos observations ont une profondeur ($\sim 80\%$ de complétude à $\sim 0.7\text{ mJy}$) et une surface ($\sim 680\text{ min. d’arc carré}$) comparable aux champs “Lockman

Deep” et “Marano Deep” observés à $15\mu\text{m}$ dans le cadre du temps garanti consacré aux relevés extra-galactiques (Elbaz et al. 1999). Ces observations offrent un complément spécifique aux autres relevés par l’utilisation du filtre LW10. Nous avons ajouté à l’ensemble de ces données les magnitudes infrarouge proche extraites des relevés 2MASS (J,H,K) and DENIS (I).

Les observations *ISOCAM* produisent un catalogue de 142 sources avec un flux intégré supérieur à 0.31 mJy à un niveau de détection équivalent à 5-sigma (Seymour et al. 2007). 20 étoiles ont été identifiées en utilisant les couleurs infrarouge proche/infrarouge moyen. Par l’ajustement de modèles de spectres stellaires (incluant les modèles de Kurucz 1992) aux flux dans l’optique (USNO) et l’infrarouge proche (DENIS, 2MASS) de ces étoiles, nous avons pu prédire leurs flux dans le filtre IRAS à $12\mu\text{m}$ au moyen des relations de couleur infrarouge moyen/optique du catalogue *IRAS*, que nous avons convertis en flux dans le filtre *ISOCAM* à $12\mu\text{m}$. La comparaison entre les magnitudes observées par *ISOCAM* et celles prédites nous fournit une calibration absolue que nous appliquons ensuite à l’ensemble de notre catalogue (Seymour et al. 2007).

Parmi les 120 galaxies détectées à $12\mu\text{m}$, 105 sont présentes dans le relevé ESO-Sculpteur optique. Ce catalogue de 120 galaxies est complet jusqu’à une densité de flux de 1.29 mJy , et nous corrigeons de l’incomplétude jusqu’à 0.31 mJy par 2 méthodes indépendantes, basées respectivement sur les étoiles et sur les contreparties optiques des sources faibles. Les corrections d’incomplétude obtenues sont similaires (Seymour et al. 2007). Les Figs. 6.1 et 6.2 montrent la répartition en flux des sources, et leur distribution sur le ciel.

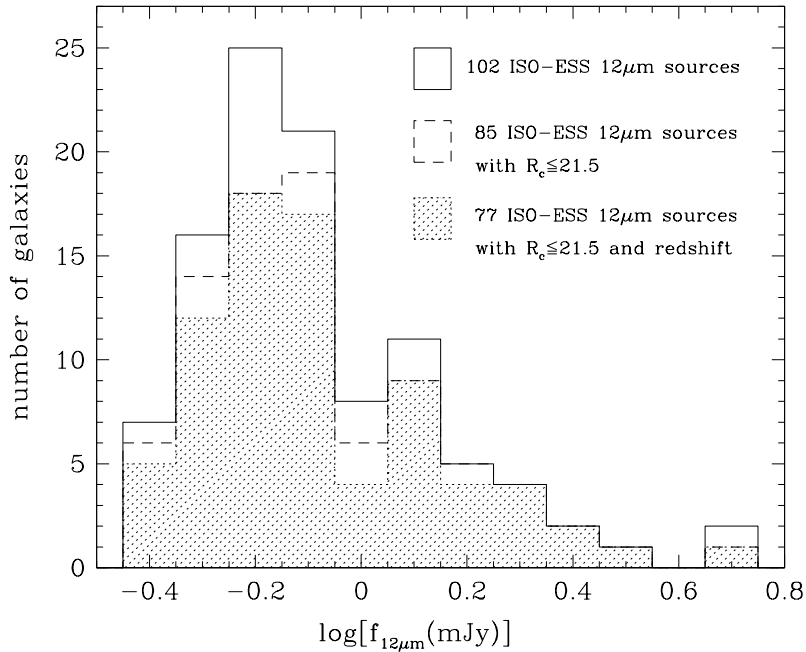


FIG. 6.1 – La distribution en flux des 102 galaxies détectées à $12\mu\text{m}$ avec *ISOCAM* dans la région explorée du relevé ESO Sculpteur. La ligne pointillée indique les 85 sources avec contre-parties optiques dans la limite $R_c \leq 21.5$, et la région hachurées les 77 sources ayant de surcroît une mesure de décalage spectral. La limite de complétude de 1.29 mJy correspond à $\log[f_{12\mu\text{m}}] = -0.11$, et les comptages sont corrigés de l’incomplétude jusqu’à $\log[f_{12\mu\text{m}}] = -0.51$.

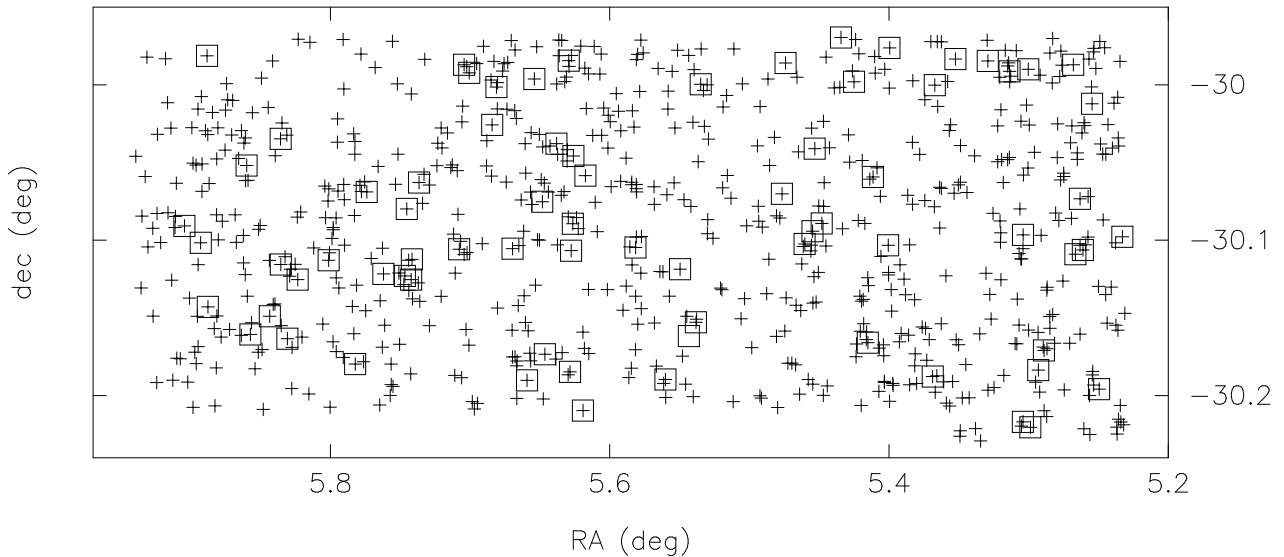


FIG. 6.2 – La distribution sur le ciel des 74 sources à $12\mu\text{m}$ détectées avec ISOCAM (carrés) parmi les 409 galaxies avec $R_c \leq 20.5$ du relevé ESO-Sculpteur (plus), dans la région commune des deux relevés.

6.4 Modélisation des comptages à $12\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$

Article: “The $12\mu\text{m}$ ISO-ESO-Sculptor and $24\mu\text{m}$ Spitzer faint counts reveal a population of ULIRGs as dusty massive ellipticals. Evolution by types and cosmic star formation”, Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., 2007, *A&A* 475, pp. 801-812.

Le suivi à $12\mu\text{m}$ du catalogue ESO-Sculpteur produit des comptages de galaxies intégrés et différentiels par intervalle de magnitude qui sont en bon accord avec ceux des autres relevés extragalactiques à $15\mu\text{m}$, obtenus également avec *ISOCAM*: un comportement Euclidien aux grands flux, puis un excès marqué aux faibles flux, entre 0.1 et 1 mJy, comme le montre la Fig. 6.3 (Rocca-Volmerange et al. 2007).

Comme les échelles de temps caractéristiques de l’émission des étoiles et de la poussière sont différentes, les comptages dans l’infrarouge moyen sont a priori distincts des comptages optiques. Une interprétation cohérente doit décrire simultanément les deux types d’émission. Dans ce but, nous modélisons les comptages *ISOCAM* du champ ESO-Sculpteur au moyen du code de synthèse évolutive PÉGASE.3 (“Projet d’Etude des GALaxies par Synthèse Evolutive” ; Fioc et al. 2011). Cette version du modèle d’évolution spectro-photométrique PÉGASE développé à l’IAP (www.iap.fr/pegase) permet de décrire simultanément l’émission des étoiles et de la poussière, caractérisées par des échelles de temps et des domaines de longueur d’onde différents. Dans ce modèle, chaque type de galaxie est défini par un scénario spécifique de transformation du gaz en étoiles, calibré à $z = 0$ sur les spectres observés dans l’Univers local (Rocca-Volmerange & Guiderdoni 1988). Ce modèle permet de prédire les distributions spectrales d’énergie depuis l’UV jusqu’à l’infrarouge lointain. Nous utilisons les différents types de galaxies normales ainsi que les fractions par type provenant du bon ajustement des comptages profonds dans l’optique et l’infrarouge proche (bandes UBVR_IK) effectués avec PÉGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1999).

La modélisation avec PÉGASE.3 montre que les populations de galaxies normales ne permettent pas d’expliquer l’excès dans les comptages infrarouge moyen, et confirme la contribution négligeable des galaxies elliptiques normales à $z \leq 4$, car à ce stade d’évolution des scénarios, elles ont expulsé tout leur gaz et leur poussière. Cependant, en ajoutant une petite population de galaxies elliptiques sur-lumineuses dans l’infrarouge moyen, nous obtenons un bon ajustement des comptages *ISOCAM* à $12\mu\text{m}$ (Rocca-Volmerange et al. 2007). Ces galaxies sur-lumineuses sont massives et poussiéreuses, et sont interprétées comme des ULIRGs (“Ultra Luminous Infrared Galaxies”) qui présenteraient des similarités avec les galaxies hôtes de radio-galaxies. Le même modèle ajuste de surcroît les comptages à $24\mu\text{m}$ obtenus avec

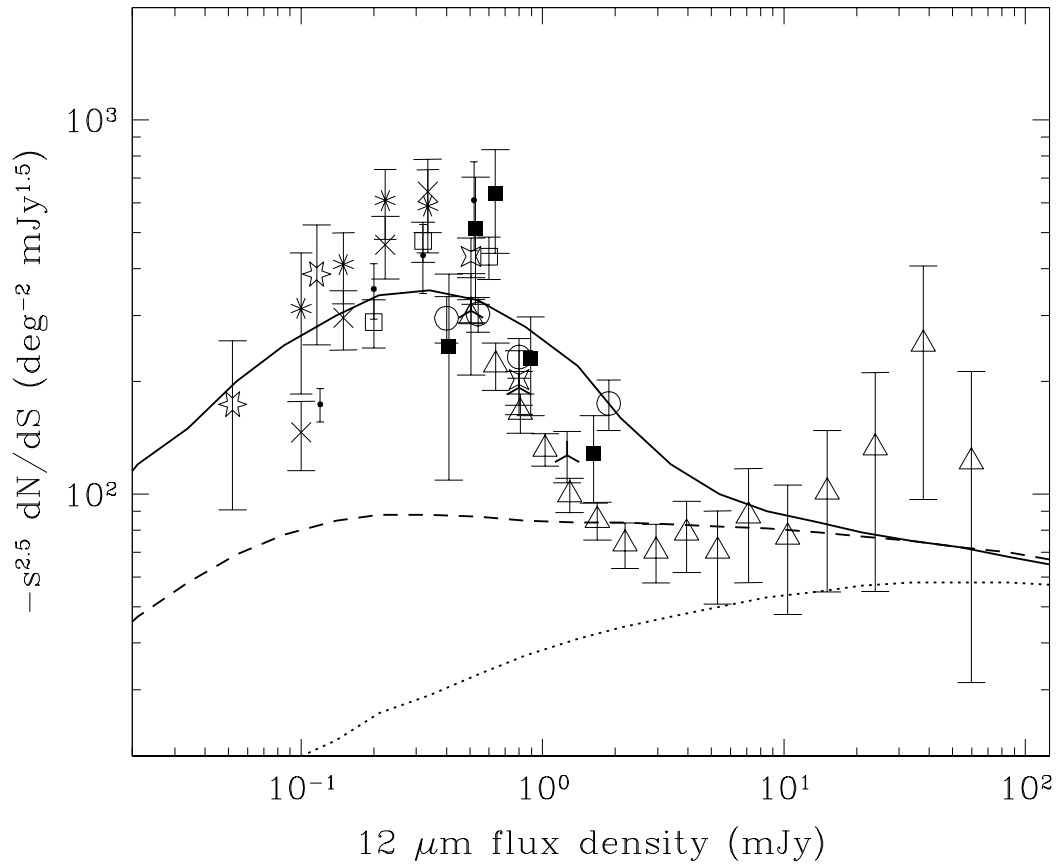


FIG. 6.3 – Les comptages différentiels du relevé ESO-Sculpteur obtenus à $12\mu\text{m}$ avec ISOCAM (carrés pleins), comparés aux autres comptages obtenus avec ISOCAM à $15\mu\text{m}$. Les comptages sont normalisés à un Univers Euclidien. La courbe en trait plein montre la prédiction avec PÉGASE.3 en incluant la population d’ULIRG évoluant selon un scénario de galaxies elliptiques. La courbe tiretée prend en compte les corrections- k mais ignore l’évolution ; la courbe pointillée correspond à l’effet d’expansion de l’Univers uniquement (corrections- k et évolution ignorées).

Spitzer (Papovich et al. 2004), en utilisant les mêmes paramètres de modélisation (Rocca-Volmerange et al. 2007).

Nous parvenons ainsi à modéliser avec PÉGASE.3 l’évolution des comptages infrarouge moyen avec un modèle en quelque sorte “minimal” : sans introduire d’évolution intrinsèque du nombre de galaxies, comme pourraient l’induire des coalescences fréquentes de galaxies ou la formation récente de nouvelles galaxies, et sans évolution en luminosité qui resulterait d’une augmentation soudaine et massive du taux de formation d’étoiles à $z \simeq 2-3$. Dans cet intervalle de décalage vers le rouge, parmi les galaxies PÉGASE.3, seules celles de type spirale précoce (Sa) montrent une augmentation de leur taux de formation d’étoiles, mais qui n’est pas suffisante pour expliquer l’excès des comptages dans l’infrarouge moyen.

6.5 Propriétés des sources à $12\mu\text{m}$

Sur les 120 galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$, 77 ont des mesures de type spectral et de décalage vers le rouge obtenus dans l’optique. Afin de mieux comprendre la nature des galaxies causant l’excès dans les comptages, nous avons calculé leur distribution en luminosité absolue à $12\mu\text{m}$. Les flux mesurés sont convertis au moyen des corrections k calculées avec PÉGASE.3, en utilisant pour

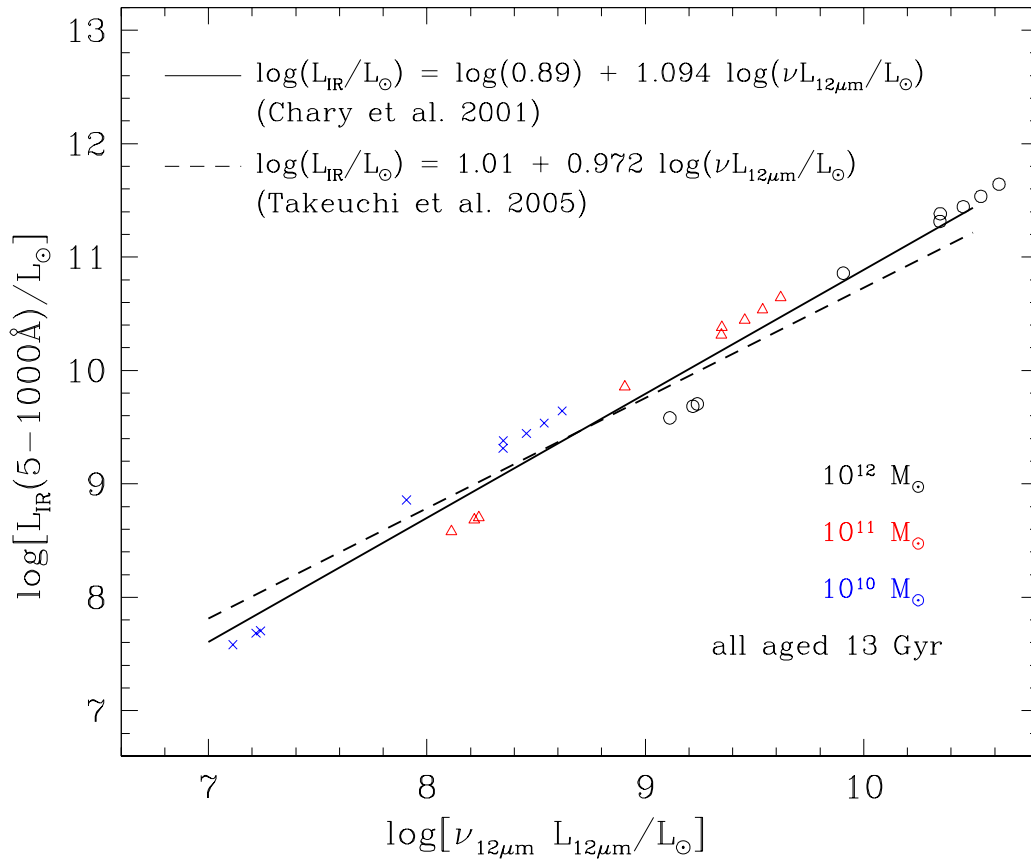


FIG. 6.4 – La relation entre la luminosité infrarouge totale $L(5 - 1000)\mu\text{m}$ et la luminosité monochromatique à $12\mu\text{m}$ prédite par les spectres des modèles PÉGASE.3 âgés de 13 milliards d'années, pour 3 valeurs de la masse stellaire: $10^{10} M_{\odot}$, $10^{11} M_{\odot}$, et $10^{12} M_{\odot}$. Les ajustements obtenus par Chary & Elbaz (2001) et Takeuchi et al. (2005) sont indiqués.

chaque spectre observé le modèle de même type spectral. Les luminosités infrarouges totales (intégrées de 5 à $1000\mu\text{m}$) sont déduites en utilisant les rapports aux luminosités à $12\mu\text{m}$ prédits par PÉGASE.3 pour chaque type de galaxie. Ces calculs sont l'occasion de montrer que la corrélation observée entre la luminosité infrarouge à $12\mu\text{m}$ et la luminosité infrarouge totale des galaxies (Chary & Elbaz 2001; Elbaz et al. 2002; Takeuchi et al. 2005) est bien reproduite avec PÉGASE.3, et qu'elle résulte de la séquence des différents types de galaxies à différentes masses, comme indiqué dans la Fig. 6.4.

Appliquée aux galaxies détectées à $12\mu\text{m}$, la classification spectrale optique du relevé ESO-Sculpteur indique que 2/3 des sources ont des spectres de spirales tardives (Sbc, Sc, Sd), et 1/3 des spectres de spirales précoces (Sa, Sb). La répartition des sources à $12\mu\text{m}$ dans le plan des deux paramètres utilisés pour la classification spectrale est montrée dans la Fig. 6.5, et l'on peut constater que plus de la moitié des sources présentent la raie d'émission de [OII] à 3727\AA .

L'examen de la distribution des largeurs équivalentes de la raie de [OII] pour les sources à $12\mu\text{m}$ dans la Fig. 6.6 (panneau de gauche) suggère qu'elles présentent un taux de formation d'étoiles plus important que les galaxies non-émettrices dans l'infrarouge, affectant préférentiellement les galaxies de type spirale précoce (panneau de droite). Ces résultats sont en bon accord avec l'idée que l'émission infrarouge de ces galaxies serait due à des sursauts de formation d'étoiles enfouis dans la poussière (Pozzi et al. 2004; La Franca et al. 2004).

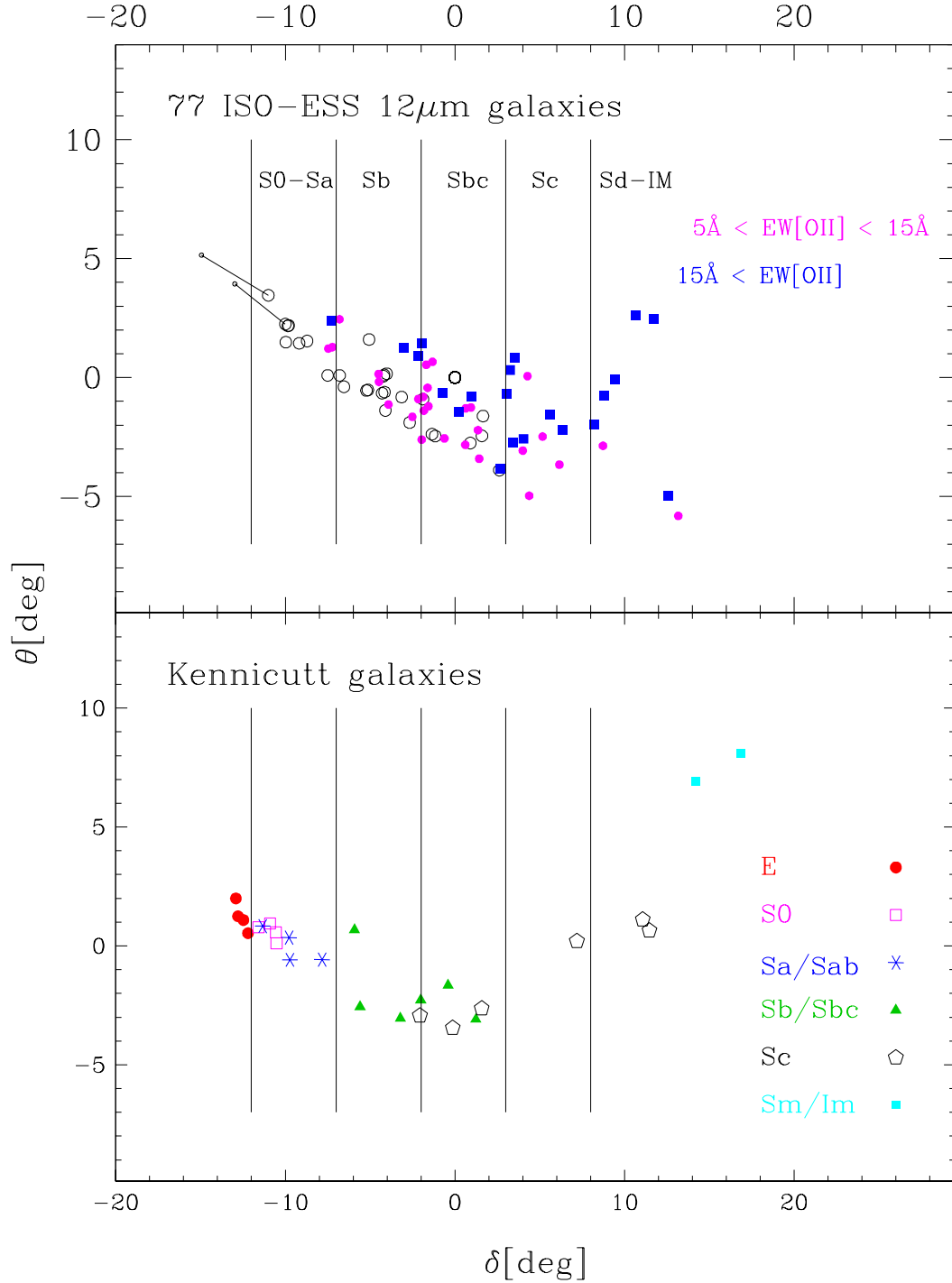


FIG. 6.5 – Dans le panneau du haut, la classification spectrale optique des 77 galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$. Les lignes verticales séparent l'échantillon en types spectraux par référence à la bibliothèque de galaxies de Kennicutt (1992) avec types morphologiques et spectroscopie, montrée dans le panneau du bas. Les galaxies avec une largeur équivalente de la raie en émission de [OII] inférieure ou supérieure à 5\AA , et supérieure à 15\AA sont indiquées avec des symboles différents.

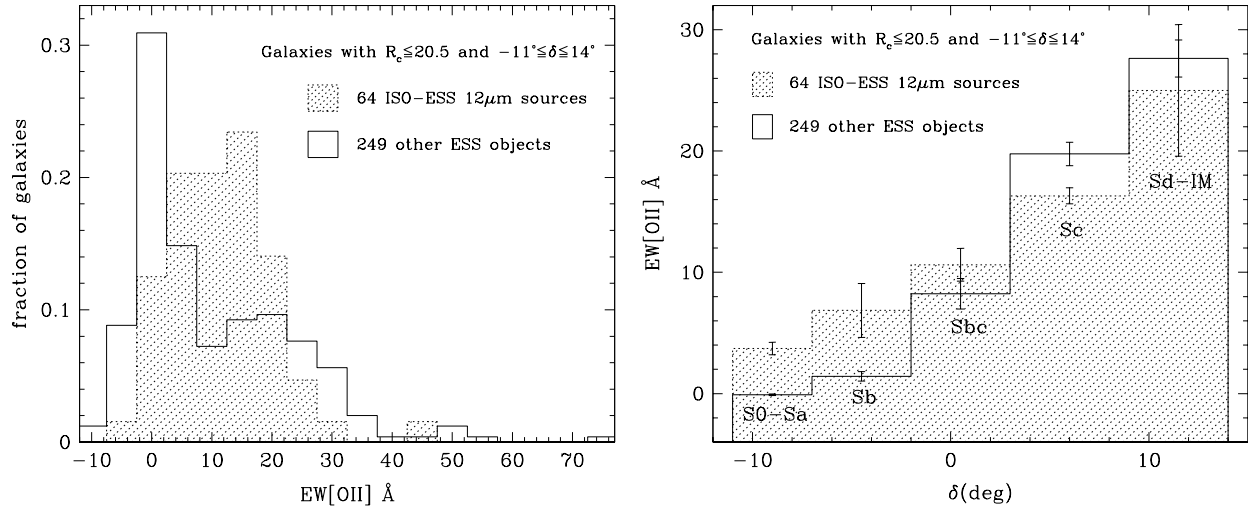


FIG. 6.6 – A gauche, comparaison de la répartition relative des largeurs équivalentes de la raie de $[OII]$ pour les 64 galaxies à $12\mu\text{m}$ (histogramme hachuré) et les 249 galaxies du relevé optique non émettrices à $12\mu\text{m}$. Ce diagramme ne considère que les galaxies dont l'intervalle spectral contient la raie de $[OII]$. Les deux échantillons sont limités à $R_c \leq 20.5$ et à $-11^\circ \leq \delta \leq 14^\circ$ (voir Fig. 6.5). A droite, les médianes des largeurs de la raie de $[OII]$ par intervalle de type spectral, comme défini dans la Fig. 6.5.

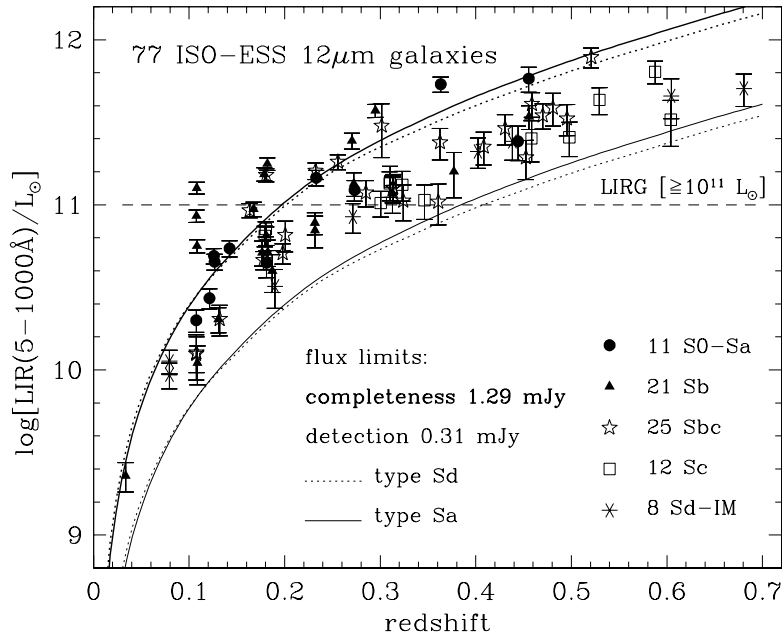


FIG. 6.7 – La distribution de la luminosité infrarouge totale pour les 77 sources ISO-ESO-Sculpteur ayant un décalage spectral. Les corrections-k des différents types spectraux indiquées proviennent des modèles spectro-photométriques correspondants de PEGASE.3.

La Fig. 6.7 montre que les luminosités infrarouges totales de l'ensemble des galaxies ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$ sont comprises entre $10^{10}M_{\odot}$ et $10^{12}M_{\odot}$, et environ la moitié des objets sont situés de part et d'autre de la limite à $10^{11}M_{\odot}$, correspondant aux LIRG ("Luminous InfraRed Galaxies"). Les galaxies de type spirale précoce et tardive apparaissent des deux côtés de la luminosité maximale des LIRG. A noter qu'aucune des galaxies du relevé n'atteint la luminosité des ULIRGs, qui pourrait cependant être atteinte par certaines des 43 galaxies n'ayant pas de spectroscopie optique.

La mesure des fonctions de luminosité à $12\mu\text{m}$ de l'ensemble de ces galaxies indique un excès de galaxies d'un facteur 2 à 5 aux luminosités infrarouges $\gtrsim 10^{10.4}L_{\odot}$ par rapport aux galaxies locales (Rush et al. 1993; Pozzi et al. 2004). Ces divers résultats sont en accord avec les résultats obtenus avec *Spitzer* (Pérez-González et al. 2005; Le Floch et al. 2005), ainsi que des résultats plus récents (Le Borgne et al. 2009), indiquant la prédominance de LIRGs à $z \sim 0.5$ au sein des comptages à $15\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$.

Enfin, la mesure des luminosités totales infrarouge par unité de masse stellaire (estimées par l'émission optique) pour les sources à $12\mu\text{m}$ montre un excès d'un facteur 3 à 5 par rapport aux prédictions des scénarios PEGASE.3 (voir Fig. 6.8). Nous parvenons à modéliser cette dispersion en introduisant une stochastécité temporelle dans le taux de formation d'étoiles d'un facteur 5 et maintenue pendant plusieurs dizaines de millions d'années (Fioc, en préparation). L'examen visuel des images optiques indique qu'une partie des galaxies semblent être des spirales apparemment normales, d'autres objets ont des isophotes perturbés et se situent dans des environnement denses (groupes ou amas).

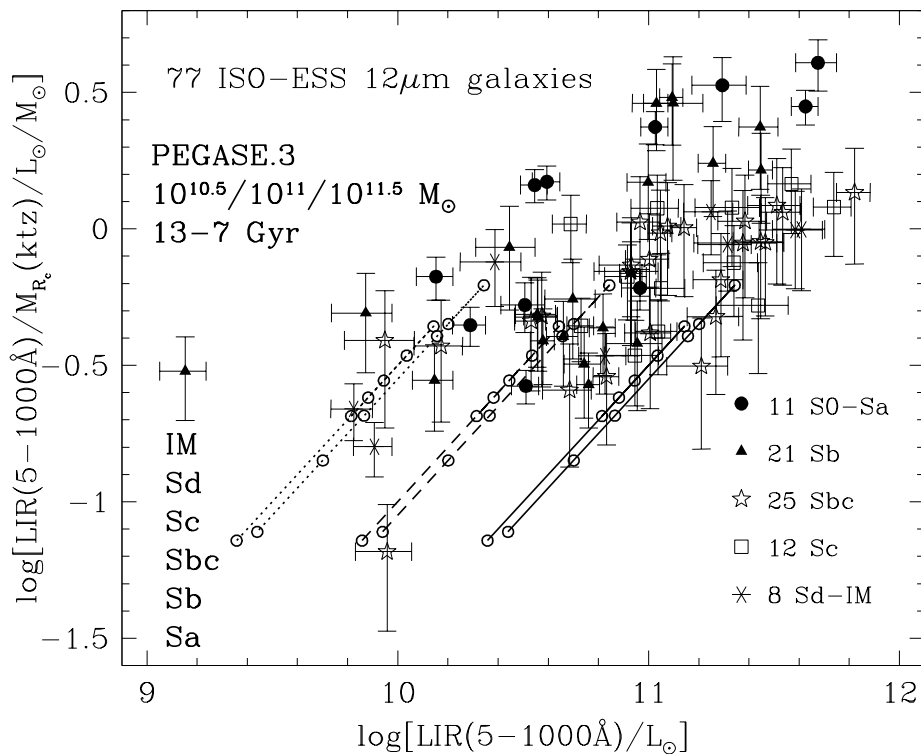


FIG. 6.8 – La distribution de la luminosité infrarouge totale par unité de masse stellaire pour les galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$ avec ISOCAM. On observe des galaxies de type spectral précoce qui sont 3 à 5 fois plus lumineuses que les spirales de type plus tardif, contrairement à ce qui est prédit par les scénarios PEGASE.3 des types Sa à Im (de bas en haut) pour des masses de $10^{10.5}M_{\odot}$ (lignes pointillées), $10^{11}M_{\odot}$ (lignes tiretées), $10^{11.5}M_{\odot}$ (lignes continues). Pour chaque valeur de masse, la prédiction est montrée pour des âges de 13 et 7 milliards d'années (avec un petit décalage des derniers en abscisse).

La meilleure photométrie qui sera obtenue avec le VST et VISTA (relevés KIDS et VIKING) dans cette région du ciel permettrait d'effectuer des décompositions bulbe+disque des galaxies ESO-Sculpteur au moyen des outils de morphologie automatique développés dans le cadre du programme EFIGI (voir Sect. 3), et avec une meilleure fiabilité qu'à partir des images ESO de moindre qualité. On pourrait alors examiner si certaines des sources contribuant à l'excès des comptages à $12\mu\text{m}$ sont compatibles avec des profils de galaxies composées uniquement d'un bulbe, ce qui permettrait de tester directement le modèle de Rocca-Volmerange et al. (2007). De manière générale, on pourrait préciser la nature optique des sources et distinguer les objets atypiques.

Références

- Aaronson, M. 1978, *ApJ*, 221, L103
- Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., et al. 2008, *ApJS*, 175, 297
- Andreon, S. 1998, *A&A*, 336, 98
- Arnouts, S. 1996, PhD thesis, Univ. Paris VII, (1996)
- Arnouts, S., de Lapparent, V., Mathez, G., et al. 1997, *A&AS*, 124, 163
- Ashman, K. M., Salucci, P., & Persic, M. 1993, *MNRAS*, 260, 610
- Athanassoula, E. 2005, *MNRAS*, 358, 1477
- Balcells, M. & Peletier, R. F. 1994, *AJ*, 107, 135
- Baugh, C. M., Benson, A. J., Cole, S., et al. 2002, in *The Mass of Galaxies at Low and High Redshift*, Venice 2001, eds. R. Bender, A. Renzini
- Bellanger, C. & de Lapparent, V. 1995, *ApJ*, 455, L103
- Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., et al. 1995, *A&AS*, 110, 159
- Bennett, C. L., Banday, A. J., Gorski, K. M., et al. 1996, *ApJ*, 464, L1+
- Berlind, A. A. & Weinberg, D. H. 2002, *ApJ*, 575, 587
- Berlind, A. A., Weinberg, D. H., Benson, A. J., et al. 2003, *ApJ*, 593, 1
- Berta, S., Magnelli, B., Lutz, D., et al. 2010, *A&A*, 518, L30+
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Bertin, E. & Dennefeld, M. 1997, *A&A*, 317, 43
- Bois, M., Bournaud, F., Emsellem, E., et al. 2010, *MNRAS*, 406, 2405
- Bolzonella, M., Miralles, J.-M., & Pelló, R. 2000, *A&A*, 363, 476
- Boroson, T. A. & Thompson, I. B. 1987, *AJ*, 93, 33
- Bournaud, F., Chapon, D., Teyssier, R., et al. 2011, *ApJ*, 730, 4
- Brand, K., Rawlings, S., Hill, G. J., et al. 2003, *MNRAS*, 344, 283
- Brimioulle, F., Lerchster, M., Seitz, S., Bender, R., & Snigula, J. 2008, *ArXiv eprint*
- Broadhurst, T. J., Ellis, R. S., Koo, D. C., & Szalay, A. S. 1990, 343, 726
- Bruzual, G. A. & Charlot, S. 1993, *ApJ*, 405, 538
- Busswell, G. S., Shanks, T., Outram, P. J., et al. 2004, *MNRAS*, 354, 991
- Buzzoni, B., Delabre, B., Dekker, H., et al. 1984, *The Messenger*, 38, 9
- Cabanac, R. A., de Lapparent, V., & Hickson, P. 2000, *A&A*, 364, 349
- Campos, A. & Shanks, T. 1997, *MNRAS*, 291, 383+
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnovic, D., et al. 2011, *ArXiv e-prints*
- Chary, R. & Elbaz, D. 2001, *ApJ*, 556, 562
- Choi, Y., Park, C., Kim, J., et al. 2010, *ApJS*, 190, 181
- Cimatti, A., Daddi, E., & Renzini, A. 2006, *A&A*, 453, L29
- Clowes, R. G. & Campusano, L. E. 1991, *MNRAS*, 249, 218
- Coil, A. L., Newman, J. A., Croton, D., et al. 2008, *ApJ*, 672, 153
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Cole, S., Norberg, P., Baugh, C. M., et al. 2001, *MNRAS*, 326, 255

- Colless, M. M., Peterson, B. A., Jackson, C. A., et al. 2003a, *astro-ph/0306581*
- Colless, M. M., Peterson, B. A., Jackson, C. A., et al. 2003b, *astro-ph/0306581*
- Connolly, A. J., Szalay, A. S., Bershadsky, M. A., Kinney, A. L., & Calzetti, D. 1995, *ApJ*, 110, 1071
- Cooper, M. C., Newman, J. A., Weiner, B. J., et al. 2008, *MNRAS*, 383, 1058
- Coupon, J., Ilbert, O., Kilbinger, M., et al. 2009, *A&A*, 500, 981
- Cross, N. J. G., Driver, S. P., Liske, J., et al. 2004, *MNRAS*, 349, 576
- Davis, M., Faber, S. M., Newman, J., et al. 2003, in *Discoveries and Research Prospects from 6- to 10-Meter-Class Telescopes II*. Edited by Guhathakurta, Puragra. *Proceedings of the SPIE*, Volume 4834, pp. 161-172 (2003)., 161-172
- Davis, M., Guhathakurta, P., Konidaris, N. P., et al. 2007, *ApJ*, 660, L1
- de la Torre, S., Meneux, B., De Lucia, G., et al. 2011, *A&A*, 525, A125+
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., & Bardelli, S. 2004, *A&A*, 422, 841
- de Lapparent, V., Bellanger, C., Arnouts, S., et al. 1993, *The Messenger*, 72, 34
- de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., & Arnouts, S. 2003, *A&A*, 404, 831
- de Lapparent, V., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1986a, *ApJ*, 302, L1
- de Lapparent, V., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1989a, *ApJ*, 343, 1
- de Lapparent, V., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1991, *ApJ*, 369, 273
- de Lapparent, V., Kurtz, M. J., & Geller, M. J. 1986b, *ApJ*, 304, 585
- de Lapparent, V., Mazure, A., Mathez, G., & Mellier, Y. 1989b, *The Messenger*, 55, 5
- de Lapparent, V. & Slezak, E. 2007, *A&A*, 472, 29
- De Lucia, G., Springel, V., White, S. D. M., Croton, D., & Kauffmann, G. 2006, *MNRAS*, 366, 499
- De Propriis, R., Conselice, C. J., Liske, J., et al. 2007, *ApJ*, 666, 212
- De Propriis, R., Couch, W. J., Colless, M., et al. 2002, *MNRAS*, 329, 87
- Debbastista, V. P., Carollo, C. M., Mayer, L., & Moore, B. 2004, *ApJ*, 604, L93
- Dekker, H., D’Odorico, S., Kotzłowski, H., et al. 1991, *The Messenger*, 63, 73
- D’Odorico, S. 1990, *The Messenger*, 61, 51
- Dole, H., Le Floc’h, E., Pérez-González, P. G., et al. 2004, 154, 87
- Driver, S. P., Liske, J., Cross, N. J. G., De Propriis, R., & Allen, P. D. 2005, *MNRAS*, 360, 81
- Driver, S. P., Popescu, C. C., Tuffs, R. J., et al. 2007, *MNRAS*, 379, 1022
- Dunkley, J., Komatsu, E., Nolte, M. R., et al. 2009, *ApJS*, 180, 306
- Efstathiou, G., Ellis, R. S., & Peterson, B. A. 1988, *MNRAS*, 232, 431
- Einasto, J., Hütsi, G., Einasto, M., et al. 2003, *A&A*, 405, 425
- Eisenstein, D. J., Blanton, M., Zehavi, I., et al. 2005, *ApJ*, 619, 178
- Elbaz, D., Cesarsky, C. J., Chantal, P., et al. 2002, *A&A*, 384, 848
- Elbaz, D., Cesarsky, C. J., Fadda, D., et al. 1999, *A&A*, 351, L37
- Faucherre, M. 1995, *The Messenger*, 80, 5
- Ferguson, H. C. & Sandage, A. 1991, *AJ*, 101, 765
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1997, *A&A*, 326, 950
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1999, *A&A*, 344, 393
- Fioc, M., Rocca-Volmerange, B., & Dwek, E. 2011
- Flint, K., Metevier, A. J., Bolte, M., & Mendes de Oliveira, C. 2001, *ApJS*, 134, 53
- Folkes, S., Ronen, S., Price, I., et al. 1999, *MNRAS*, 308, 459
- Fort, B., Mellier, Y., Picat, J. P., Rio, Y., & Lelievre, G. 1986, in *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, Vol. 627, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, ed. D. L. Crawford, 321-327
- Franceschini, A., Rodighiero, G., Vaccari, M., et al. 2010, *A&A*, 517, A74+
- Franzetti, P., Scodreggio, M., Garilli, B., et al. 2007, *A&A*, 465, 711
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K., et al. 2001, *ApJ*, 553, 47

- Fried, J. W., von Kuhlmann, B., Meisenheimer, K., et al. 2001, *A&A*, 367, 788
- Frith, W. J., Buswell, G. S., Fong, R., Metcalfe, N., & Shanks, T. 2003, *MNRAS*, 345, 1049
- Gabasch, A., Bender, R., Seitz, S., et al. 2004, *A&A*, 421, 41
- Galaz, G. 1997, PhD thesis, , Paris VI University, (1997)
- Galaz, G. & de Lapparent, V. 1998, *A&A*, 332, 459
- Garilli, B., Le Fèvre, O., Guzzo, L., et al. 2008, *A&A*, 486, 683
- Geller, M. J. & Huchra, J. P. 1989, *Science*, 246, 897
- Geller, M. J., Kurtz, M. J., & de Lapparent, V. 1984, *ApJ*, 287, L55
- Gott, J. R., Choi, Y., Park, C., & Kim, J. 2009, *ApJ*, 695, L45
- Gott, III, J. R., Dickinson, M., & Melott, A. L. 1986, *ApJ*, 306, 341
- Gott, III, J. R., Hambrick, D. C., Vogeley, M. S., et al. 2008, *ApJ*, 675, 16
- Gott, III, J. R., Weinberg, D. H., & Melott, A. L. 1987, *ApJ*, 319, 1
- Graham, A. W. & Worley, C. C. 2008, *MNRAS*, 388, 1708
- Groth, E. J. & Peebles, P. J. E. 1977, *ApJ*, 217, 385
- Guedes, J., Callegari, S., Madau, P., & Mayer, L. 2011, *ArXiv e-prints*
- Guisard, S. 1996, *The Messenger*, 83, 11
- Guisard, S., Weilenmann, U., van Dijsseldonk, A., Käufl, H. U., & Roucher, J. 1997, *The Messenger*, 90, 9
- Guzzo, L., Pierleoni, M., Meneux, B., et al. 2008, *Nature*, 451, 541
- Haines, C. P., Campusano, L. E., & Clowes, R. G. 2004, *A&A*, 421, 157
- Hamilton, A. J. S., Gott, III, J. R., & Weinberg, D. 1986, *ApJ*, 309, 1
- Hamuy, M., Suntzeff, N. B., Heathcote, S. R., et al. 1994, *PASP*, 106, 566
- Hamuy, M., Walker, A. R., Suntzeff, N. B., et al. 1992, *PASP*, 104, 533
- Hawkins, E., Maddox, S., Cole, S., et al. 2003, *MNRAS*, 346, 78
- Heyl, J., Colless, M., Ellis, R. S., & Broadhurst, T. 1997, *MNRAS*, 285, 613
- Hoyle, F. & Vogeley, M. S. 2004, *ApJ*, 607, 751
- Huchra, J., Davis, M., Latham, D., & Tonry, J. 1983, *ApJS*, 52, 89
- Ilbert, O., Lauger, S., Tresse, L., et al. 2006, *A&A*, 453, 809
- Jauzac, M., Dole, H., Le Floch, E., et al. 2011, *A&A*, 525, A52+
- Jenkins, A., Frenk, C. S., White, S. D. M., et al. 2001, *MNRAS*, 321, 372
- Jerjen, H. & Tammann, G. A. 1997a, *A&A*, 321, 713
- Jerjen, H. & Tammann, G. A. 1997b, *A&A*, 321, 713
- Kaiser, N. & Peacock, J. A. 1991, *ApJ*, 379, 482
- Kaviraj, S., Kirkby, L. A., Silk, J., & Sarzi, M. 2007, *MNRAS*, 382, 960
- Kennicutt, R. C. 1992, *ApJS*, 79, 255
- Kewley, L. J., Jansen, R. A., & Geller, M. J. 2005, *PASP*, 117, 227
- Kurucz, R. L. 1992, in *IAU Symp. 149: The Stellar Populations of Galaxies*, 225
- La Franca, F., Gruppioni, C., Matute, I., et al. 2004, *AJ*, 127, 3075
- Lagache, G., Dole, H., & Puget, J.-L. 2003, *MNRAS*, 338, 555
- Lagache, G., Puget, J.-L., & Dole, H. 2005, *ARA&A*, 43, 727
- Landolt, A. U. 1992, *AJ*, 104, 372
- Le Borgne, D., Elbaz, D., Ocvirk, P., & Pichon, C. 2009, *A&A*, 504, 727
- Le Borgne, D. & Rocca-Volmerange, B. 2002, *A&A*, 386, 446
- Le Floch, E., Papovich, C., Dole, H., et al. 2005, *ApJ*, 632, 169
- Lilly, S. J., Cowie, L. L., & Gardner, J. P. 1991, *ApJ*, 369, 79
- Lin, H., Yee, H. K. C., Carlberg, R. G., et al. 1999, *ApJ*, 518, 533
- Loveday, J., Peterson, B. A., Efsthathiou, G., & Maddox, S. J. 1992, *ApJ*, 390, 338
- MacTavish, C. J., Ade, P. A. R., Bock, J. J., et al. 2006, *ApJ*, 647, 799

- Maddox, S. J., Efstathiou, G., & Sutherland, W. J. 1990a, MNRAS, 246, 433+
- Maddox, S. J., Efstathiou, G., Sutherland, W. J., & Loveday, J. 1990b, MNRAS, 243, 692
- Maddox, S. J., Sutherland, W. J., Efstathiou, G., Loveday, J., & Peterson, B. A. 1990c, MNRAS, 247, 1P
- Madgwick, D. S., Lahav, O., Baldry, I. K., et al. 2002, MNRAS, 333, 133
- Magnelli, B., Elbaz, D., Chary, R. R., et al. 2009, A&A, 496, 57
- Mathis, H., Lemson, G., Springel, V., et al. 2002, MNRAS, 333, 739+
- Metcalfe, N., Shanks, T., Fong, R., & Roche, N. 1995, MNRAS, 273, 257
- Miller, L., Croom, S. M., Boyle, B. J., et al. 2004, MNRAS, 355, 385
- Montero-Dorta, A. D. & Prada, F. 2009, MNRAS, 399, 1106
- Ocvirk, P., Pichon, C., & Teyssier, R. 2008, MNRAS, 390, 1326
- Oppenheimer, B. D., Davé, R., Kereš, D., et al. 2010, MNRAS, 406, 2325
- Papovich, C., Dole, H., Egami, E., et al. 2004, 154, 70
- Park, C., Choi, Y., Vogeley, M. S., et al. 2005a, ApJ, 633, 11
- Park, C., Choi, Y.-Y., Vogeley, M. S., et al. 2005b, ApJ, 633, 11
- Park, C. & Gott, III, J. R. 1991, MNRAS, 249, 288
- Peng, Y., Lilly, S. J., Kovač, K., et al. 2010, ApJ, 721, 193
- Percival, W. J., Cole, S., Eisenstein, D. J., et al. 2007, MNRAS, 381, 1053
- Perez-Gonzalez, P. G., Gallego, J., Zamorano, J., et al. 2003, ApJ, in press, astro-ph/0303088
- Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Egami, E., et al. 2005, ApJ, 630, 82
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. 1999, ApJ, 517, 565
- Poggianti, B. M. 1997, A&AS, 122, 399
- Pogosyan, D., Pichon, C., Gay, C., et al. 2009, MNRAS, 396, 635
- Pomarède, D., Fidaali, Y., & Teyssier, R. 2009, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 406, Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONOM-2008, ed. N. V. Pogorelov, E. Audit, P. Colella, & G. P. Zank, 317–+
- Popescu, C. C., Tuffs, R. J., Dopita, M. A., et al. 2011, A&A, 527, A109+
- Postman, M., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1988, AJ, 95, 267
- Pozzi, F., Gruppioni, C., Oliver, S., et al. 2004, ApJ, 609, 122
- Puech, M., Hammer, F., Flores, H., et al. 2010, A&A, 510, A68+
- Puech, M., Hammer, F., Lehnert, M. D., & Flores, H. 2007, A&A, 466, 83
- Ratcliffe, A., Shanks, T., Parker, Q. A., et al. 1998, MNRAS, 300, 417
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, AJ, 116, 1009
- Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., & Fioc, M. 2007, A&A, 475, 801
- Rocca-Volmerange, B. & Guiderdoni, B. 1988, A&AS, 75, 93
- Rodighiero, G., Vaccari, M., Franceschini, A., et al. 2010, A&A, 515, A8+
- Rush, B., Malkan, M. A., & Spinoglio, L. 1993, 89, 1
- Sajina, A., Scott, D., Dennefeld, M., et al. 2006, MNRAS, 369, 939
- Sandage, A., Binggeli, B., & Tammann, G. A. 1985, AJ, 90, 1759
- Sanders, D. B. & Mirabel, I. F. 1996, ARA&A, 34, 749
- Scannapieco, C., Gadotti, D. A., Jonsson, P., & White, S. D. M. 2010, MNRAS, 407, L41
- Scannapieco, E. & Broadhurst, T. 2001, ApJ, 549, 28
- Schaeffer, R. & Silk, J. 1988, A&A, 203, 273
- Schechter, P. 1976, ApJ, 203, 297
- Schuecker, P. & Ott, H. 1991, ApJ, 378, L1
- Scodeggio, M., Franzetti, P., Garilli, B., et al. 2005, PASP, 117, 1284
- Segalovitz, A. 1975, A&A, 40, 401
- Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., & de Lapparent, V. 2007, A&A, 475, 791

- Shectman, S. A., Landy, S. D., Oemler, A., et al. 1996, *ApJ*, 470, 172
- Silk, J. 2011, ArXiv e-prints
- Skrutskie, M. F. 2001, *BAAS*, 33, 827
- Small, T. A., Ma, C., Sargent, W. L. W., & Hamilton, D. 1999, *ApJ*, 524, 31
- Sodre, L. & Cuevas, H. 1997, *MNRAS*, 287, 137
- Sousbie, T., Colombi, S., & Pichon, C. 2009, *MNRAS*, 393, 457
- Sousbie, T., Pichon, C., Courtois, H., Colombi, S., & Novikov, D. 2008, *ApJ*, 672, L1
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al. 2005, *Nature*, 435, 629
- Stoughton, C., Lupton, R. H., Bernardi, M., et al. 2002, *AJ*, 123, 485
- Takeuchi, T. T., Buat, V., Iglesias-Páramo, J., Boselli, A., & Burgarella, D. 2005, *A&A*, 432, 423
- Tarenghi, M. & Wilson, R. N. 1989, in Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, Vol. 1114, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. F. J. Roddier, 302–313
- Teyssier, R., Chapon, D., & Bournaud, F. 2010, *ApJ*, 720, L149
- Trentham, N. & Tully, R. B. 2002, *MNRAS*, 335, 712
- Tyson, J. A. 1988, *AJ*, 96, 1
- van der Laan, H. 1988a, *The Messenger*, 52, 3
- van der Laan, H. 1988b, *The Messenger*, 51, 1
- van der Laan, H. 1989, *The Messenger*, 55, 2
- Vergani, D., Scodeggio, M., Pozzetti, L., et al. 2008, *A&A*, 487, 89
- Vettolani, G., Zucca, E., Zamorani, G., et al. 1997, *A&A*, 325, 954
- Vigroux, L., Souviron, J., Lachieze-Rey, M., & Vader, J. P. 1988, *A&AS*, 73, 1
- Vogele, M. S., Park, C., Geller, M. J., Huchra, J. P., & Gott, J. R. I. 1994, *ApJ*, 420, 525
- Wake, D. A., Nichol, R. C., Eisenstein, D. J., et al. 2006, *MNRAS*, 372, 537
- Weinberg, D. H., Gott, III, J. R., & Melott, A. L. 1987, *ApJ*, 321, 2
- Weiss, A. G. & Buchert, T. 1993, *A&A*, 274, 1
- Widrow, L. M., Perrett, K. M., & Suyu, S. H. 2003, *ApJ*, 588, 311
- Williger, G. M., Campusano, L. E., Clowes, R. G., & Graham, M. J. 2002, *ApJ*, 578, 708
- Wolf, C., Meisenheimer, K., Rix, H.-W., et al. 2003, *A&A*, 401, 73
- Xu, C., Lonsdale, C. J., Shupe, D. L., O’Linger, J., & Masci, F. 2001, *ApJ*, 562, 179
- Yee, H. K. C., Morris, S. L., Lin, H., et al. 2000, *ApJS*, 129, 475
- Zehavi, I., Eisenstein, D. J., Nichol, R. C., et al. 2005a, *ApJ*, 621, 22
- Zehavi, I., Weinberg, D. H., Zheng, Z., et al. 2004, *ApJ*, 608, 16
- Zehavi, I., Zheng, Z., Weinberg, D. H., et al. 2005b, *ApJ*, 630, 1
- Zucca, E., Ilbert, O., Bardelli, S., et al. 2006, *A&A*, 455, 879

Troisième partie

LE CATALOGUE MORPHOLOGIQUE EFIGI

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les catalogues morphologiques

Le catalogue RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991) a longtemps été la référence pour obtenir les types morphologiques ainsi que des informations sur la présence de barres et d’anneaux pour les galaxies proches. Au total ~ 23000 galaxies avec $B_T \lesssim 15.5$ ont été répertoriées à partir de plaques photographiques. En ce qui concerne l’étude des particularités morphologiques, des catalogues complémentaires se limitent à une ou quelques propriétés pour de petits échantillons et/ou dans des régions préférentielles du ciel (Kormendy 1979; Buta 1995; Naim et al. 1997; Buta et al. 2006, 2007).

Récemment, la mise à disposition des images et des catalogues du relevé “Sloan Digital Sky Survey” (SDSS, <http://www.sdss.org>) a permis la création de larges base de données morphologiques. D’une part le “Galaxy Zoo” (Lintott et al. 2008) utilise la participation du grand public pour obtenir la classification de centaines de milliers d’objets selon des critères simples : profil lisse ou avec disque, composantes multiples, nombre de bras et enroulement, proéminence du bulbe, barres, anneaux, allées de poussières et irrégularités. D’autre part, une classification par type de Hubble avec attributs secondaires signalant la présence de barres, anneaux, lentilles, distortions, queues de marée, bras spiraux, et poussière, ainsi que le niveau d’intensité de certains d’entre eux a été obtenue par Nair & Abraham (2010) pour ~ 14000 galaxies du SDSS.

1.2 Liens entre les caractéristiques spectrales et morphologiques des galaxies

La morphologie des galaxies apparaît comme étroitement liée à la formation d’étoile et son évolution. D’une part, les différents types de galaxies identifiés historiquement sur plaques photographiques, et plus récemment dans les grands relevés digitaux ont des distributions en énergie spectrale caractéristiques, indiquant pour chacune une forme spécifique d’évolution de la formation d’étoiles avec le temps (Guidedoni & Rocca-Volmerange 1987, A&A 186, 1; Bruzual & Charlot 1993, ApJ 405, 538). En outre, les images profondes du ciel obtenues avec les grands télescopes au sol et le Télescope Spatial de Hubble ont montré que la morphologie des galaxies a évolué de façon marquée depuis $z \sim 2$, les galaxies spirales apparaissant de plus en plus perturbées à grande distance, avec des indices d’interactions et fusions de plus en plus fréquents (Brinchmann *et al.* 1998, ApJ 499, 112).

Si l’évolution spectrale des galaxies a été largement défrichée en utilisant la photométrie et de la spectroscopie intégrée des objets, l’évolution de la morphologie reste à quantifier précisément. La difficulté réside dans l’instabilité des estimateurs de forme disponibles jusqu’à présent, en raison de leur sensibilité à la qualité des images (bruit, échantillonnage, réponse impulsionnelle), et aux effets de sélection (brillance de surface). Or la morphométrie, ou mesure de paramètres de forme, offre des perspectives intéressantes car elle permet d’explicitier la nature des variations spectrales. Lors de sursauts de formation d’étoiles,

on devrait distinguer par morphométrie les modes simples de changement, par exemple l’amplification d’une composante ou la déformation des profils. Pour les mêmes raisons, la morphométrie peut aussi être un outil performant pour poser des contraintes sur les taux de fusions majeures des différents types de galaxies, qui sont, d’après les modèles de formation hiérarchique des galaxies, à l’origine des galaxies les plus massives observées actuellement.

La forme intrinsèque et apparente des galaxies a aussi des conséquences sur les mesures statistiques caractérisant les galaxies et leur évolution. La mesure de la poussière dans les disques a montré que les magnitudes B des disques et bulbes peuvent être atténuées jusqu’à 1-2 magnitudes aux fortes inclinaisons : jusqu’à 35% et 71% des photons émis par les disques et bulbes respectivement peuvent être absorbés dans l’Univers local, ce qui ne peut manquer d’affecter sensiblement les catalogues optiques existants (Driver *et al.* 2007, MNRAS 379, 1022), et les modélisation spectrales qui en sont déduites. En outre, les propriétés réelles et observées des galaxies dans l’optique dépendent de leur inclinaison (Maller *et al.* 2009, ApJ 691, 394), et un large échantillon recensant les caractéristiques des galaxies en fonction de l’inclinaison est nécessaire pour corriger ces effets.

1.3 Statut actuel de la morphométrie des galaxies

Au niveau des algorithmes, il est possible d’ajuster des profils réguliers (Simard *et al.* 2002), et de mesurer les déviations par rapport à ces profils (Conselice 1997). Mais ces outils sont dépendants de la réponse impulsionnelle,

Les outils disponibles et largement utilisés jusqu’à présent sont GIM2D (Simard 1998) et GALFIT (Peng *et al.* 2002), qui offrent en mode automatique une décomposition bulbe+disque, mais souffrent notamment d’une modélisation approximative de la réponse impulsionnelle et ne sont pas optimisés pour une application sur des grands échantillons contenant des centaines de milliers de galaxies. En outre, ces outils ne prennent pas en compte l’ensemble des caractéristiques morphologiques des objets (bras spiraux, anneaux, barres, poussière).

Quant aux mesures de concentration, d’asymétrie et de morcellement (Abraham *et al.* 1994; Conselice *et al.* 2000; Conselice 2003), les coefficients de Gini mesurant le degré de variation de la distribution de lumière (Abraham *et al.* 2003), les mesures de “granularité” (Yamauchi *et al.* 2005), les harmoniques circulaires pour la modélisation des bras spiraux (?), toutes ces approches sont malheureusement dépendantes du seeing, de l’échantillonnage et des caractéristiques du bruit des images, ne permettant pas une comparaison fiable entre différents relevés (Lisker 2008).

Parmi les approches de morphométrie visuelle figurent le “Galaxy Zoo” : 1 million de galaxies du SDSS ont été classées par le grand public selon des critères simples : profil lisse ou avec disque, composantes multiples, nombre de bras et enroulement, proéminence du bulbe, barres, anneaux, allées de poussières et irrégularités (Lintott *et al.* 2008). Cette analyse montre que la “bi-modalité” du diagramme couleur-magnitude des galaxies cache des populations importantes de galaxies spirales rouges, et une population moindre mais réelle de galaxies elliptiques bleues. Le catalogue “Galaxy Zoo” montre aussi une corrélation marginale ($2 - 3\sigma$) entre les sens de rotation de galaxies voisines, ce qui pourrait être la preuve d’un couplage gravitationnel entre les halos de matière noire au moment de l’effondrement des grandes structures (Slosar *et al.* 2009).

Le lien entre la morphologie des galaxies et leur environnement a pu être réexploré récemment grâce aux nouveaux grands relevés, apportant des clarifications et de nouvelles interrogations. Par la mesure de la concentration et de l’indice de Sersic pour 80 000 galaxies du SDSS, la bi-modalité dans la relation couleur-magnitude des galaxies apparaît comme déterminée par la densité locale de galaxies, le lien morphologie-densité découlant de la relation couleur-densité, qui, elle, serait intrinsèque (Blanton *et al.* 2005) Cependant, une analyse du catalogue de Shapley-Ames ne confirme pas la dichotomie couleur-magnitude quand les galaxies sont examinées par type morphologique le long de la séquence de Hubble (van den Bergh 2007). En outre, la relation diamètre-magnitude des galaxies semble indépendante de la densité de l’environnement dans l’Univers local (van den Bergh 2008), mais cela doit être confirmé avec de plus grands échantillons.

En parallèle, les simulations de formation des galaxies dans un Univers avec matière noire dominé par une constante cosmologique (Lambda-CDM) produisent des prédictions sur la morphologie des galaxies. Par exemple, l'analyse des deux approches actuelles de simulations semi-analytiques (modèles de Durham et du Max-Planck Astroph. Inst.) suggère que, hormis les galaxies elliptiques les plus massives, la majorité des galaxies elliptiques et spirales acquièrent leur masse stellaire par des fusions mineures ou des instabilités de disque (Parry et al. 2009). Par des simulations N-corps+SPH, Debattista et al. (2006) montrent aussi que la formation des barres est un phénomène majeur dans l'évolution séculaire des disques. En effet, la fréquence observée des barres a diminué d'un facteur 3 pendant la dernière moitié de l'âge de l'Univers, en lien avec l'accroissement de la masse stellaire, le rougissement et la plus grande prééminence du bulbe, ce qui indique une maturation "dynamique" des galaxies massives (Sheth et al. 2008). Les bulbes des galaxies précoces avec barres semblent avoir en outre subi un enrichissement en métaux différent des bulbes sans barres, suggérant que la formation des bulbes et des barres est liée (Pérez & Sánchez-Blázquez 2011).

Au moyen de simulations hydrodynamiques de formation de grandes spirales, Scannapieco et al. (2010) montrent la distinction entre les mesures photométriques et dynamiques des rapports de flux disque/total, et la difficulté de réconciliation avec les observations. Des comparaisons des modèles avec des échantillons observés de quelques milliers de galaxies fournissent en outre des résultats intéressants, et soulignent la nécessité de confrontation avec de grands échantillons statistiques. A titre d'exemple, la fraction des galaxies spirales ayant de très petits disques est bien plus importante dans les données (SDSS) que dans les prédictions des simulations numériques Lambda-CDM (Barazza et al. 2008); et les galaxies les plus vieilles à $z \sim 2$ étaient extrêmement compactes (Damjanov et al. 2009).

Cet état des lieux montre la nécessité de mettre en place des outils performants de morphométrie permettant de comparer les propriétés des galaxies proches avec celles des galaxies à $z \gtrsim 1$. La seule approche numérique réellement fiable pour effectuer des mesures morphométriques comparatives entre relevés est l'ajustement de modèles convolués par la réponse impulsionnelle. Ces outils doivent être appliqués à des échantillons statistiques basés sur une imagerie CCD multi-couleur et bien échantillonnée. Des catalogues de référence recensant toutes les caractéristiques morphologiques des galaxies, avec une validation visuelle sont de surcroît nécessaires pour le contrôle et la calibration des outils automatiques. Dans ce qui suit, je décris les programmes mis en place à l'IAP afin de suivre cette démarche.

Chapitre 2

Morphologie visuelle

Avec l’objectif de pouvoir tester et calibrer les algorithmes automatiques de morphométrie qui sont discutés dans Sect. 3, nous nous sommes attachés à la construction d’un catalogue de référence fournissant l’intensité de divers attributs morphologiques pour tous les types de Hubble.

Ce projet fait partie du programme “Extraction de Formes Idéalisées de Galaxies en Imagerie” (EFIGI) initié en 2004 par Emmanuel Bertin, qui mit sur pied une collaboration entre les laboratoires d’astrophysique indiqués ci-dessous et deux laboratoires spécialisés dans le traitement du signal (Laboratoire “Traitement de Communication de l’Information”, LTCI; et Laboratoire “Recherche et Développement de l’EPITA”, LRDE). La collaboration obtint un financement par le biais d’une “Action Concertée Incitative” de type “Masses de Données”, et permis à Anthony Baillard, élève de l’Ecole pour l’Informatique et les Techniques Avancées (EPITA), de démarrer une thèse à l’IAP. L’autre volet du programme était le développement d’outils de morphométrie de haut niveau permettant d’analyser dans des temps suffisamment courts les grands relevés multi-couleurs tels que le CFHTLS et WIRDS.

Je fus immédiatement séduit par le projet, ayant constaté par l’analyse du relevé ESO-Sculpteur les limites de la caractérisation des populations de galaxies par leur propriétés spectrales ou photométriques. J’entrevois alors, pour mieux comprendre la formation et l’évolution des galaxies, l’importance d’une exploration d’un espace des paramètres plus large que les simples mesures de flux auquel, on ajouterait celles de la taille et de la forme des objets.

2.1 Collaborateurs

- Emmanuel Bertin (IAP)
- Anthony Baillard (ex-doctorant IAP ; actuellement dans le privé)
- Henry McCracken (IAP)
- Yannick Mellier (IAP)
- Stéphane Arnouts (TCFH, en détachement du Laboratoire d’Astrophysique de Marseille)
- Pascal Fouqué (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Jean-François Leborgne (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Roser Pelló (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Philippe Prugniel (Centre de Recherches Astronomique de Lyon)
- Dmitry Makarov (Special Astrophysical Observatory, Russie)
- Lidia Marakova (Special Astrophysical Observatory, Russie)
- Albert Bijaoui (Observatoire Nice Côte d’Azur)
- Lidia Tasca (Laboratoire d’Astrophysique de Marseille)

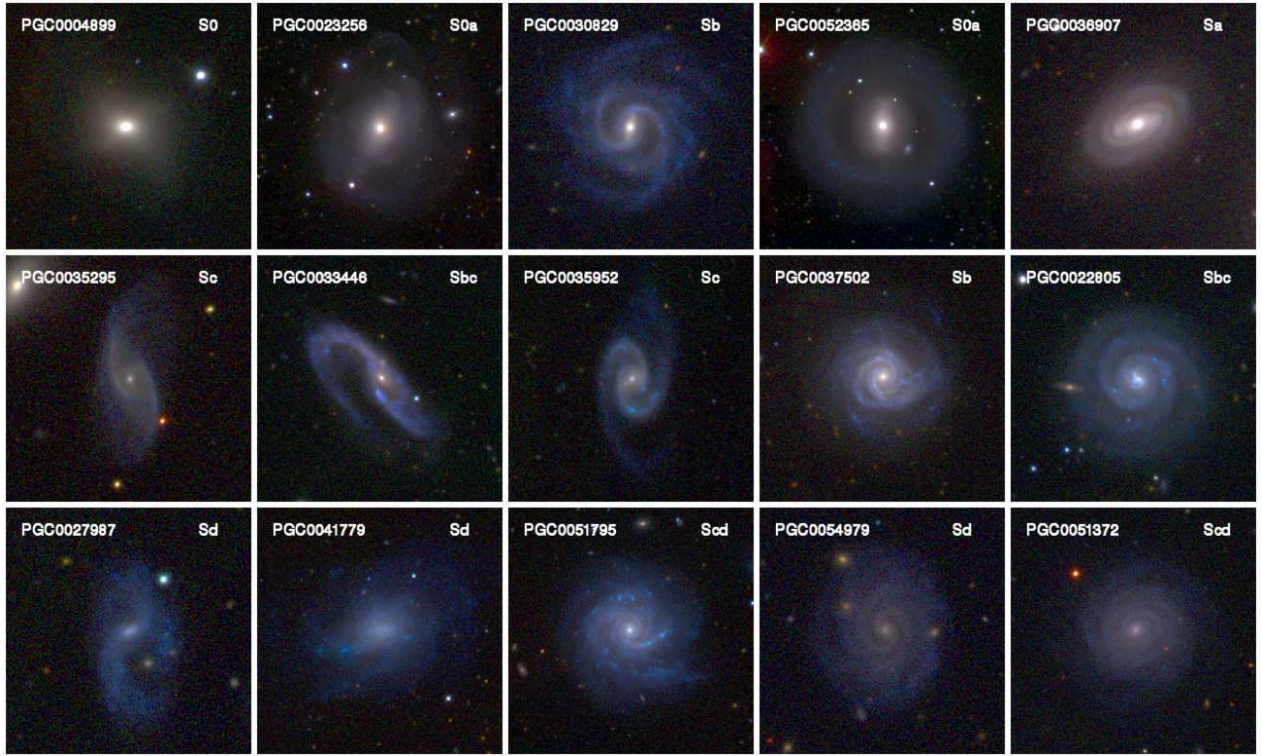


FIG. 2.1 – Images de galaxies illustrant l’attribut caractérisant la courbure des bras spiraux. Les 5 niveaux d’attributs sont montrés horizontalement (croissant vers la droite), et pour chaque niveau, 3 galaxies de type de plus en plus tardif sont affichées de haut en bas.

2.2 Echantillon étiqueté EFIGI

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”, Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A., *A&A*, sous presse.

Thèse: “Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies”, Baillard, B., 2008 (<http://efigix.iap.fr/theseAB/>)

Article: “An Automatic Method to Determine the Degree of Flocculence of a Galaxy”, Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., Baillard, A., Bertin, E., **de Lapparent, V.** and Mellier, Y., Fouqué, P., Borgne, J.-F. L. and Pelló, R., Makarov, D., Makarova, L., Prugniel, P., Arnouts, S., 2008, *ASP Conference Series 394*, pp. 497.

L’échantillon comprend 4458 galaxies proches avec imagerie *ugriz* extraite du relevé DR4 du SDSS et plusieurs mesures du type RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991), conduisant à une mesure fiable du type morphologique dans le catalogue PGC (“Principal Galaxy Catalogue”, Paturel et al. 1995). Les objets sont distribués sur toute la région du ciel couverte par le “Data Release 4” du SDSS, soit 6851 deg².

Après construction des images couleurs “*gri*” rééchantillonnées afin d’avoir la même taille angulaire apparent des objets tout en conservant la brillance de surface, nous avons défini des attributs morphologiques décrivant les différentes composantes des galaxies, dont leur structure dynamique et leur texture, ainsi que l’apparence des objets sur le ciel et leur environnement. Les 16 attributs choisis mesurent pour

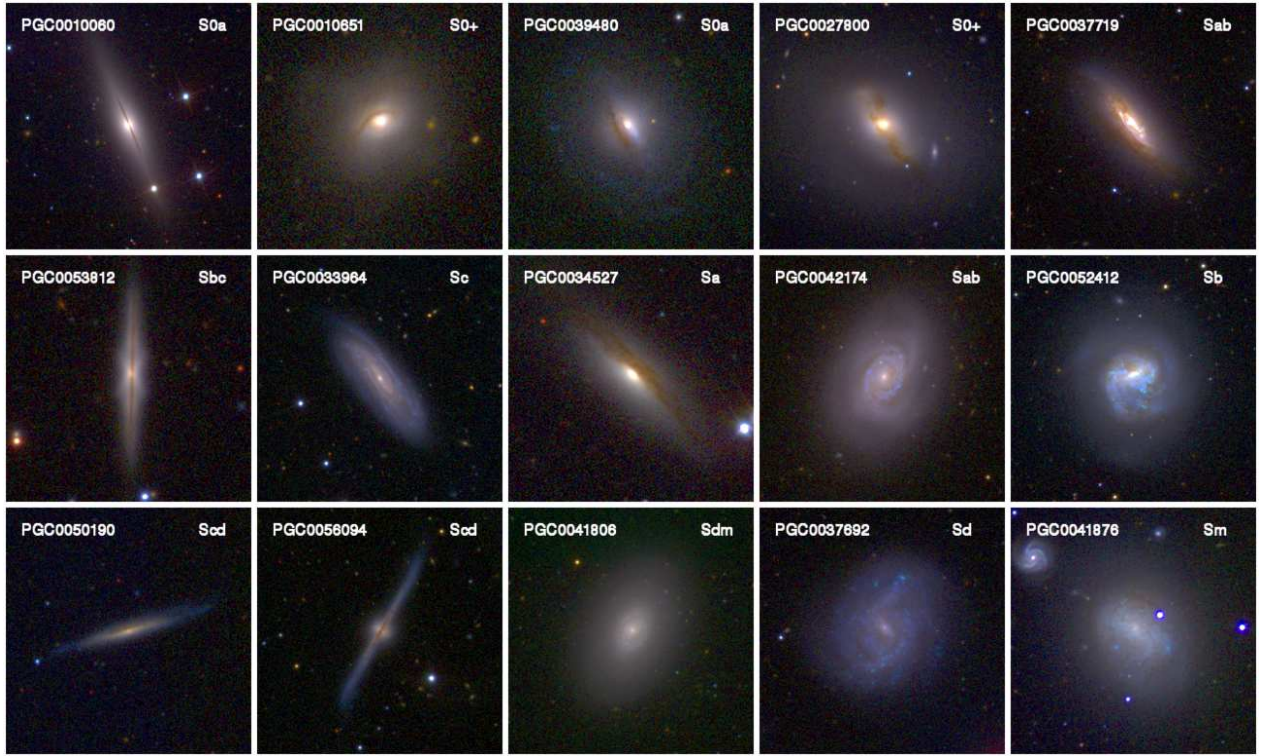


FIG. 2.2 – Même chose que la Fig. précédente pour l'attribut caractérisant la dispersion de la poussière.

chaque galaxie les quantités suivantes:

- le rapport de luminosité du bulbe sur la luminosité totale de l'objet
- la longueur des barres et l'intensité des anneaux internes et externes
- l'intensité des bras spiraux, leur courbure et leur sens de rotation
- la présence et la dispersion de la poussière
- la flocculence et les régions de formation intense d'étoiles
- la perturbation du profil
- la contamination du profil, le nombre de galaxies voisines.

La définition détaillée des différents attributs est donnée dans l'article choisi n° 7 (p. 200, Baillard et al. 2011), et dans la Table 1 de l'article choisi n° 8 (p. 231).

L'objectif de ces attributs est de relier la forme d'une galaxie aux phénomènes physiques sous-jacents, en caractérisant les composantes stellaires, gazeuses, et poussiéreuses ainsi que les structures dynamiques, et aussi de prendre en compte l'impact de l'environnement immédiat et les biais d'observation sur la forme apparente d'une galaxie. Des images de galaxies illustrant deux des attributs sont montrées dans les Figs. 2.1 et 2.2.

Le groupe d'astronome fut mobilisé pour procéder à l'étiquetage visuel des images “*gri*” selon 5 niveaux d'intensité pour chacun des 16 attributs, ainsi qu'un intervalle de confiance, soit 3 mesures par attribut. La grande disparité des mesures effectuées par les différents astronomes (Baillard et al. 2011) nous a cependant contraint, E. Bertin et moi-même, à homogénéiser l'ensemble des attributs. Le catalogue résultant fournit une base de donnée unique par sa grande statistique, sa complétude de $\sim 80\%$ à $10 \leq g \leq 14$, sa diversité et son homogénéité. Les images et catalogues sont accessibles en ligne sur le site du projet (<http://www.efigi.org>). La constitution du catalogue d'attributs fit partie de la thèse de doctorat d'Anthony Baillard.

Le catalogue EFIGI est principalement limité en diamètre apparent à 1 minute d'arc. Le diamètre est mesuré par D_{25} (de Vaucouleurs et al. 1976), correspondant à l'isophote auquel la brillance de surface est

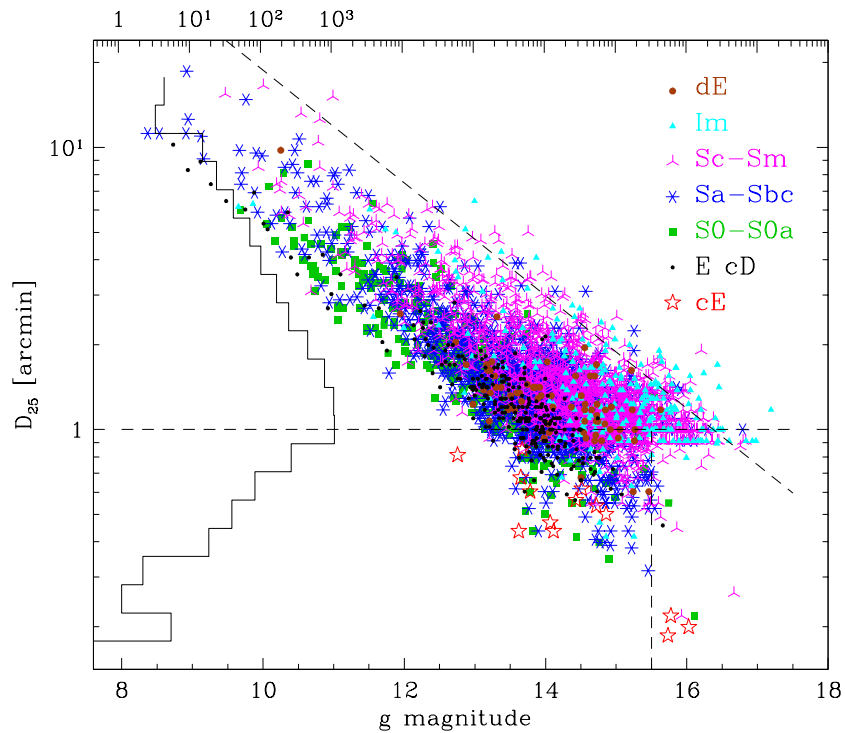


FIG. 2.3 – Diamètre isophotal D_{25} en minute d’arc en fonction de la magnitude g des galaxies du catalogue EFIGI. Ce graphe montre que le catalogue est limité en diamètre apparent à 1 minute d’arc (l’histogramme vertical montre la décroissance rapide du nombre de galaxies en dessous de cette valeur), à $g \sim 15.5$, ces 2 limites correspondant aux catalogue RC3, et à 25 mag. par seconde d’arc carré en brillance de surface (ligne inclinée), correspondant à la limite visuelle sur une copie papier des plaques du “Palomar Observatory Sky Survey” (Abell 1959).

25 mag/arcsec²; c’est la limite au delà de laquelle il est difficile d’effectuer une identification visuelle d’un objet ou d’une partie d’un objet à partir de copies sur papier des plaques photographiques du Palomar (Abell 1959). Cette sélection en diamètre contraste avec la limitation en magnitude apparente des autres catalogues morphologiques existants, et conduit à un excellent échantillonnage des spirales tardives et des irrégulières, qui est une des spécificités du catalogue EFIGI. Ce dernier contient entre ~ 150 et 500 galaxies dans chaque type de Hubble (sauf pour les types rares comme les cD et les cE), avec une grande diversité de caractéristiques morphologiques par type.

J’ai complété l’échantillon EFIGI des différentes mesures de décalages vers le rouge provenant des bases de données HyperLeda, NED, SDSS et VAGC pour un ensemble de plus de 99.5% des galaxies, ainsi que des spectres SDSS. le catalogue EFIGI est mis à la disposition de la communauté (sur le site <http://www.efigi.org>), et au CDS.

2.3 Article choisi n° 7

“The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”

Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A.

Astronomy & Astrophysics, sous presse

2011

2.4 Description statistique de la séquence de Hubble

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology II. Statistical properties along the Hubble sequence”, de **Lapparent, V.**, Baillard, B., Bertin, E., *A&A*, sous presse.

La richesse du catalogue EFIGI permet de mener pour la première fois à $z \sim 0.05$ des analyses statistiques concernant une grande diversité de propriétés morphologiques pour l'éventail complet des types de Hubble. En particulier, ce catalogue permet pour la première fois d'effectuer une description détaillée et quantitative de la séquence visuelle de Hubble (de Lapparent et al. 2011). On constate la diminution du rapport de luminosité bulbe/total le long de la séquence de Hubble, avec cependant une grande dispersion de 5 types, ainsi que la décroissance progressive de l'enroulement des bras, qui sont les critères principaux dans l'établissement de la séquence de Hubble visuelle (van den Bergh 1998).

On remarque par ailleurs que la contribution des disques à la lumière intégrée des galaxies augmente le long de la séquence de Hubble, les spirales les plus tardives étant dominées par les disques, alors que les spirales précoces sont dominées par les bulbes. Ce n'est que dans les spirales intermédiaires (Sb and Sbc) que la lumière du disque semble concentrée dans les bras spiraux. On montre en outre que cet effet, combiné avec une décroissance rapide de la quantité de poussière visible des types Sb aux types Sbc-Sc, conduit au “grand dessin” des spirales Sc.

Il est intéressant de noter que seules les galaxies Sm et Im sont perturbées fréquemment et significativement dans leur profil, probablement à cause d'interactions plus fréquentes, ou parce que celles-ci auraient laissé des traces à cause de leurs plus faibles masses. En outre, l'échantillon EFIGI montre qu'on détecte de la poussière dans tous les types de galaxies lenticulaires et spirales, avec un maximum pour les types Sb. La dispersion de la poussière augmente cependant régulièrement le long de la séquence de Hubble. Quant à la flocculence et aux régions de formation intense d'étoiles, ces deux attributs augmentent entre les types Sa et Sb, puis restent stables jusqu'aux types les plus tardifs (Sm Im).

TAB. 2.1 – *Pourcentage des galaxies EFIGI selon les 5 niveaux de longueur de barre*

Type EFIGI	Longueur de Barre						
	0	incertaine	1	2	3	4	1-2-3-4
cE cD E	100± 8	-	-	-	-	-	-
S0 ⁻	87±11	11± 3	2± 1	-	-	-	2± 1
S0	59± 9	14± 4	12± 3	11± 3	2± 1	2± 1	28± 5
S0 ⁺	51± 8	5± 2	5± 2	15± 4	20± 5	3± 2	43± 7
S0a	50± 7	8± 2	5± 2	14± 3	14± 3	8± 2	42± 6
Sa	39± 6	10± 3	4± 2	25± 4	14± 3	8± 2	51± 7
Sab	23± 4	6± 2	5± 2	23± 4	27± 5	16± 3	71± 9
Sb	37± 4	11± 2	4± 1	18± 2	21± 3	9± 2	52± 5
Sbc	44± 4	11± 2	9± 2	19± 3	12± 2	6± 1	46± 4
Sc	45± 6	10± 2	11± 3	24± 4	9± 2	1± 1	45± 6
Scd	55± 6	14± 2	13± 2	15± 3	3± 1	1± 1	31± 4
Sd	32± 6	11± 3	13± 3	29± 5	11± 3	3± 2	56± 8
Sdm	39± 5	26± 4	7± 2	17± 3	10± 2	1± 1	34± 5
Sm	55± 7	22± 4	2± 1	16± 3	5± 2	-	22± 4
Im	77± 9	16± 3	-	5± 2	2± 1	-	7± 2
dE	88±17	4± 3	2± 2	5± 3	-	2± 2	9± 4
Tous les disques	46± 2	13± 1	7± 1	17± 1	12± 1	5± 1	41± 1
Toutes les spirales	42± 2	13± 1	7± 1	20± 1	13± 1	5± 1	45± 2
Tous les types	54± 2	12± 1	6± 1	15± 1	10± 1	4± 1	35± 1

Ces résultats sont corroborés et précisés par les analyses effectuées par A. Baillard lors sa thèse de doctorat. Il a montré que l'on peut utiliser les attributs EFIGI pour restituer avec précision le type morphologique de Hubble par un apprentissage supervisé au moyen d'une "machine à vecteur de support" (SVM), permettant de séparer des nuages de points dans un espace de grande dimensionnalité (16 pour EFIGI). La précision qui en résulte est semblable à celle des astronomes en comparaison à la classification du RC3. En outre, il a appliqué une méthode de perte de précision qui consiste à oter un attribut, puis à mesurer la perte en précision qui en résulte sur le type de Hubble). Il a constaté que les attributs les plus significatifs pour la détermination de la séquence de Hubble sont par ordre décroissant d'importance : (1) le rapport de luminosité bulbe/total; (2) l'intensité des bras spiraux; (3) la courbure des bras spiraux. Viennent ensuite la quantité de poussière visible et la flocculence, avec des pertes de précision deux et trois fois moindres resp., que pour la courbure des bras (Baillard 2008).

Concernant les structures dynamiques des galaxies EFIGI, on observe que les barres sont fréquentes parmi tous les types de Hubble excepté les E et dE, et sont détectées dans 30 à 40% des lenticulaires, 20 à 70% des spirales, et 7% des Im; les barres les plus longues se situent dans les spirales Sab, pour lesquelles la fréquence de barres de toute longueur est aussi la plus grande (voir Table 2.1; la colonne "incertaine" qualifie la présence d'une barre, et non pas sa longueur). Les anneaux internes se produisent dans 25% des galaxies et sont 2 fois plus fréquents que les anneaux externes; les anneaux internes sont les plus fréquents dans les galaxies S0a, Sa, Sab, et uniquement dans les S0a pour les anneaux externes.

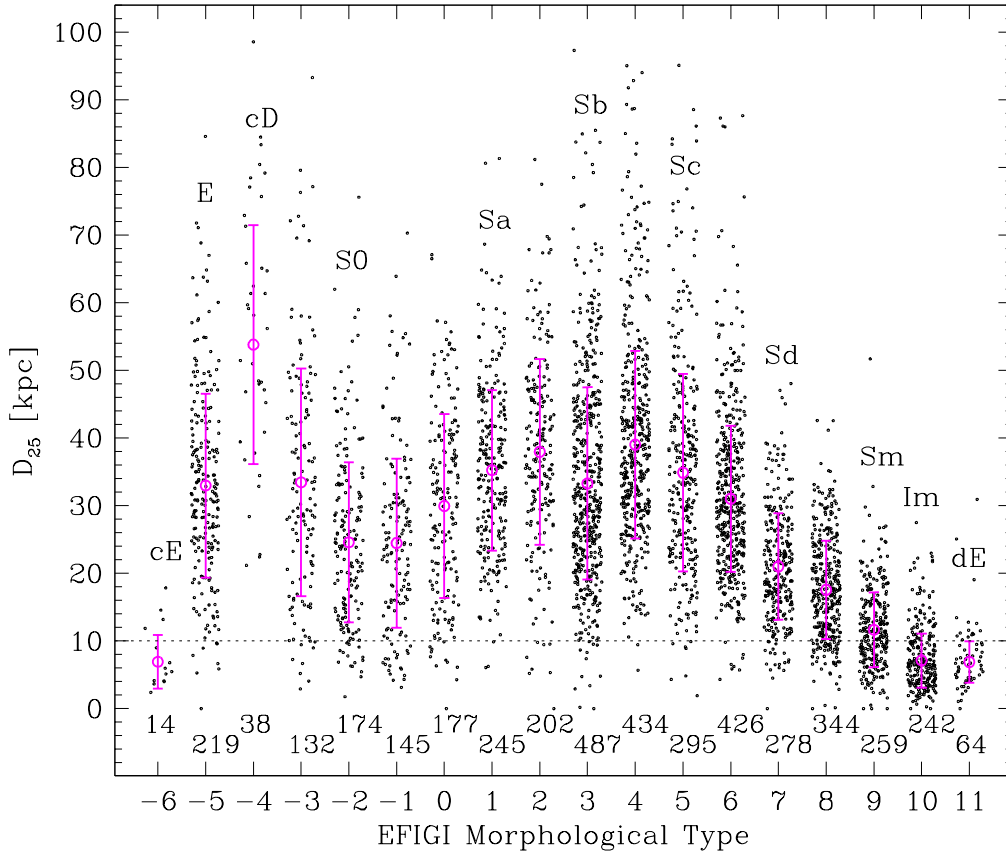


FIG. 2.4 – la distribution des diamètres intrinsèques des objets calculés à partir du D_{25} pour 4156 galaxies EFIGI en fonction du type morphologique; pour chaque type, la moyenne pondérée et la dispersion (avec rejet à 3σ) sont indiquées (une limite indicative à 10 kpc est indiquée en pointillés).

Cette analyse montre enfin une croissance progressive du diamètre des galaxies et de la brillance de surface associée le long de la séquence de Hubble, montrées dans les Figs. 2.4 et 2.5). Les plus grandes

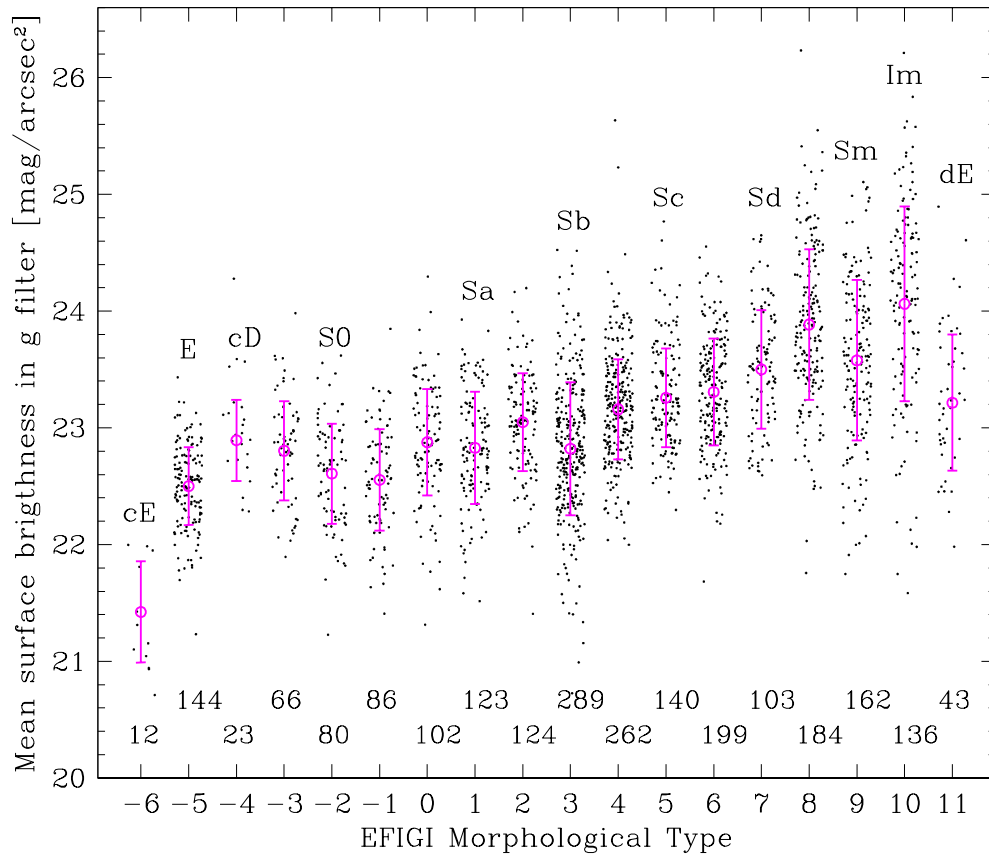


FIG. 2.5 – Même chose que dans la Fig. 2.4 pour la brillance de surface déduite du D_{25} pour 2273 galaxies EFIGI peu inclinées et faiblement contaminées.

galaxies sont les cD, puis les elliptiques et les spirales intermédiaires Sab-Sbc ($D_{25} \simeq 20 - 50$ kpc), alors que les Sd-Sdm-Sm sont deux fois plus petites. Les galaxies lenticulaires ont une taille intermédiaire ($D_{25} \simeq 15 - 35$ kpc), et les irrégulières, les elliptiques compactes (cE) et les naines elliptiques (dE et dS0) sont confirmées comme étant de petits objets ($D_{25} \simeq 5 - 15$ kpc).

2.5 Galaxies naines spirales

Grace à l'attribut d'écrivant l'intensité des bras, j'ai découvert dans l'échantillon EFIGI deux galaxies naines spirales, montrées dans la Fig. 2.6. Celles-ci sont des objets rares dans les classes morphologiques des spirales Sa à Scd (Schombert et al. 1995; Sandage & Binggeli 1984). La galaxie de gauche a des bras spiraux remarquablement réguliers et plutôt ouverts, alors qu'ils sont un peu plus fermés dans celle de droite, et avec une très légère asymétrie. Les 2 galaxies ont une petite barre, et une très faible flocculence. La structure spirale de la galaxie de droite rappelle celle que l'on voit, à un niveau de contraste moindre, dans certaines galaxies naines de type dE du catalogue EFIGI; ces dernières sont fréquentes parmi les plus brillantes dE de l'amas de la Vierge (Barazza et al. 2002; Lisker et al. 2006). Il serait intéressant d'examiner, au moyen de simulations numériques, quelles sont les contraintes posées sur les halos de matière noire sous-jacents pour obtenir des structures spirales de ce type, et d'évaluer leur stabilité temporelle.

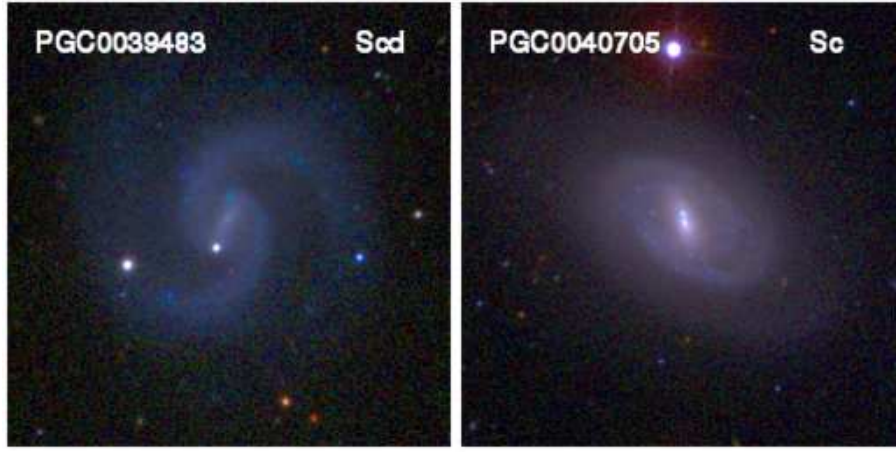


FIG. 2.6 – Images en “vraies couleurs” irg des 2 galaxies naines spirales trouvées dans le catalogue EFIGI. Ces galaxies ont pour décalage spectral 0.0026385 et 0.0006414 resp., pour magnitude absolue en g -16.9 et -14.8 resp., et pour diamètre isophotal intrinsèque (D_{25}) 5.7 kpc et 1.9 kpc resp.

2.6 Article choisi n° 8

“The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology II. Statistical properties along the Hubble sequence”

de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E.

Astronomy & Astrophysics, sous presse

2011

Chapitre 3

Morphologie automatique

Dans un deuxième temps, nous nous sommes attachés à caractériser quantitativement les objets, par l'application d'un outil automatique d'ajustement de profil convolué. La morphologie visuelle permet de contrôler les résultats automatiques, et d'améliorer leur qualité. Les résultats décrits ici s'appuient sur la mesure fiable des flux des objets. Je présente les premiers résultats concernant les fonctions de luminosité par type morphologique. Je montre par ailleurs des résultats préliminaires concernant les composantes séparées de bulbe et de disque,

3.1 Erreurs de photométrie dans le relevé SDSS

La photométrie SDSS des galaxies d'EFIGI montre des erreurs importantes pour de nombreux objets, se manifestant par une queue excédentaire de galaxies faibles, qui n'est pas présente si l'on utilise la photométrie photographique du RC3 (Baillard et al. 2011). Les logiciels de photométrie du SDSS ont été optimisés pour traiter les galaxies de diamètre isophotal apparent inférieur à 2 minutes d'arc, alors que 811 galaxies, soit 18% du catalogue EFIGI, mesurent entre 2 et 20 minutes d'arc (et 2693 entre 1 et 2 minute d'arc).

Pour refaire ce travail de mesure, j'ai utilisé les nouvelles fonctionnalités de SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) qui permettent l'ajustement non-linéaire de chaque objet par un profil bi-dimensionnel convolué par la réponse impulsienne (Bertin 2010). Les profils ajustés ici sont la somme d'une loi en $r^{1/4}$ pour le bulbe, et d'un profil exponentiel pour le disque, définis comme suit :

- loi “de Vaucouleurs” $I(r) = I_0 e^{-7.67(r/re)^{1/4}}$,
- loi exponentielle $I(r) = I_0 e^{-1.68r/re}$.

Des analyses avec un indice variable pour la première loi sont aussi possibles (loi de Sérsic) et ont été menées; elles sont discutées dans les articles en préparation (Sects. 3.4 et 3.5). Les magnitudes ainsi calculées par SExtractor sont nommées “MAG_MODEL”.

Pour le relevé SDSS, j'utilise le “Data Release 7” du SDSS (Abazajian et al. 2009; DR7 par la suite), et les magnitudes “model” et “Petrosian”. Ces dernières sont des magnitudes d'ouverture, calculées dans un rayon adaptatif ayant une brillance de surface annulaire correspondant à une fraction fixe de la brillance de surface moyenne. L'ouverture étant définie dans la bande g pour les autres 4 filtres $ugiz$, cette magnitude vise à un calcul fiable des couleurs. Dans le panneau de droite, les magnitudes SDSS “model” sont utilisées. Celles-ci sont le résultat dans un premier temps de l'ajustement de 2 profils bi-dimensionnels distincts, d'une part une loi “de Vaucouleurs”, d'autre par une loi exponentielle (définies ci-dessus), avec rapport d'axe et angle de position variable. Dans une deuxième étape, une combinaison linéaire des 2 meilleurs profils de chaque type ci-dessus est ajustée à nouveau à l'image de l'objet, et la magnitude résultant fournit la magnitude “model” des catalogues du SDSS.

La Fig. 3.1 montre, pour les galaxies d'EFIGI, la différence dans la bande g entre les magnitudes “model” du SDSS, et les magnitudes “MAG_MODEL” obtenues par SExtractor. Si l'on examine le lieu

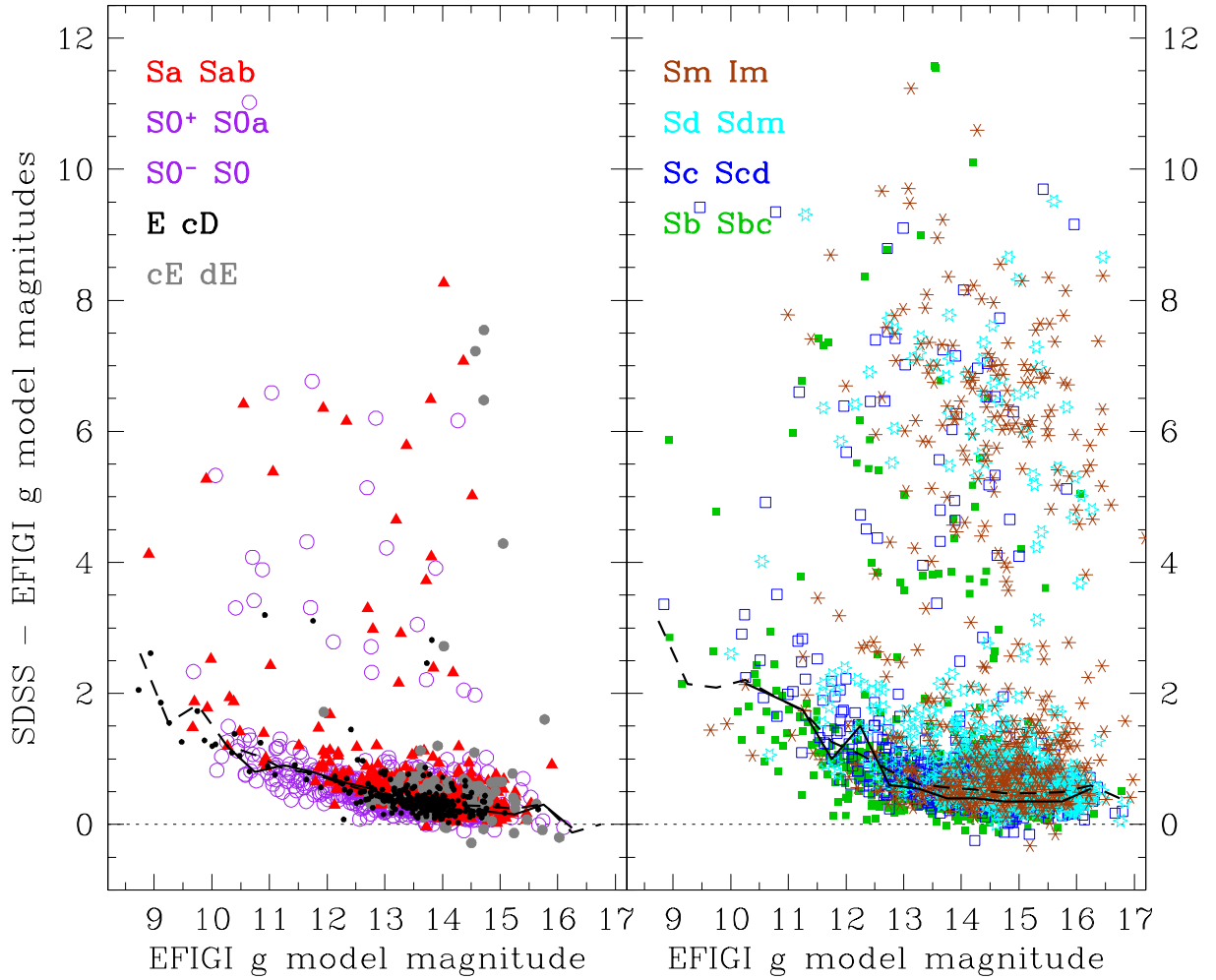


FIG. 3.1 – Différence entre les magnitudes “model” fournies dans les catalogues du relevé SDSS et celle obtenues avec SExtractor, dans la bande g et pour les 4458 galaxies d’EFIGI (de Lapparent & Bertin, 2011a, en préparation). Les différents types morphologiques sont indiqués, les galaxies avec bulbe dominant sont regroupées dans le panneau de gauche, les spirales tardives et les irrégulières dans le panneau de droite. La courbe continue indique le mode, et la courbe pointillée la médiane par intervalle de 0.5 magnitude (les moyennes sont très proches des médianes). Des courbes analogues sont obtenues en utilisant les magnitudes d’ouverture du SDSS (“Petrosian”), avec un décalage légèrement supérieur pour les galaxies précoces entre g 13-15. Ces figures montrent une surestimation systématique des flux pour les galaxies brillantes dans le SDSS, ainsi qu’une surestimation catastrophique de 2 à 10 magnitudes pour certaines galaxies, dont principalement les types tardifs.

de la majorité des galaxies (guidé par les courbes indiquant le mode et la médiane), on observe un afadissement systématique des magnitudes SDSS aux magnitudes brillantes : le fond de ciel n’est pas estimé assez loin des objets, il est par conséquent contaminé par l’objet. Cet effet est présent jusqu’aux magnitudes les plus faibles d’EFIGI, soit $g = 15 - 16$, où il est 0.25 magnitude pour les galaxies de type jusqu’à Sab, et de 0.50 magnitude pour les galaxies spirales plus tardives. Le biais augmente à 1 magnitude à $g \simeq 11 - 12$ et à 2 magnitudes pour les objets plus brillants. A noter que la transition entre les galaxies à 2 min d’arc se produit à $g = 12.5 - 13.5$ pour les galaxies précoces (panneau de gauche), et à $g = 13.5 - 14.5$ pour les spirales tardives. On s’attend à ce qu’il y ait un meilleur accord entre les magnitudes SDSS et celles obtenues avec SExtractor à $g \sim 17 - 18$, mais cela devra être confirmé.

L’autre effet remarqué dans la Fig. 3.1 (panneau de droite) est l’écart de magnitude très important pour une petite fraction des galaxies (@% pour l’ensemble des types), pour lesquelles l’écart de magnitude entre les catalogue SDSS et les mesures SExtractor s’étale entre 2 et ~ 10 magnitudes. L’effet est plus marqué pour les galaxies spirales plus tardives que Sb. L’examen de la photométrie par SExtractor de ces objets m’a permis d’analyser le problème. Les attributs EFIGI montrent qu’à partir du type Sb, la flocculence du disque augmente fortement (de Lapparent et al. 2011). Combiné à un bulbe moins dominant, cela a pour effet de causer un morcellement des objets par les algorithmes de segmentation des sources. L’effet est particulièrement aigu pour les galaxies à faible brillance de surface comme les Sd, Sm et les Im. A noter que les naines n’ayant pas ce problème de flocculence (les cE et dE), elles sont très rares à présenter ces écarts de magnitude. On observe les mêmes effets de biais systématique et de morcellement dans les autres filtres (*uriz*).

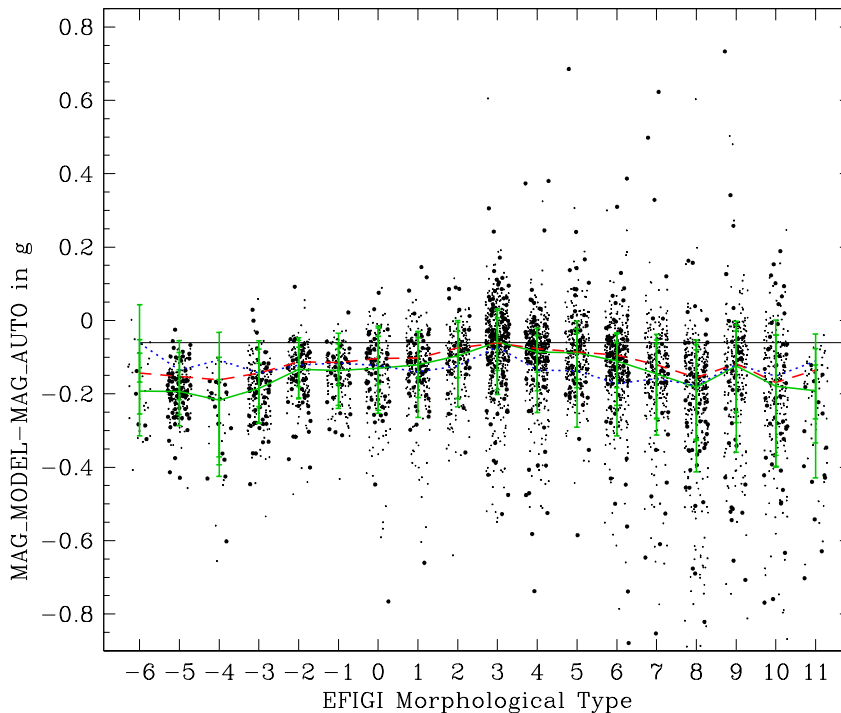


FIG. 3.2 – Différence entre les magnitudes “modèle” et d’ouverture (*MAG_AUTO*) de SExtractor dans la bande *g* pour les 4458 galaxies EFIGI, en fonction du type morphologique. Les valeurs médianes et les quantiles à 70% sont en vert. Les médianes dans les filtres *u* et *z* sont indiquées en bleu et rouge resp. La ligne horizontale indique le décalage attendu entre la magnitude *MAG_AUTO* et la “vraie” magnitude.

J’ai par ailleurs montré que les magnitudes “modèles” calculées par SExtractor sont fiables et robustes. Ces magnitudes sont intégrées jusqu’à l’infini, et par conséquent permettent de s’affranchir du problème de troncature des magnitudes d’ouverture. La différence entre ces deux types de magnitude est montrée dans la Fig. 3.2. On observe que la fraction du flux manquant dépend du type morphologique, avec 0.2

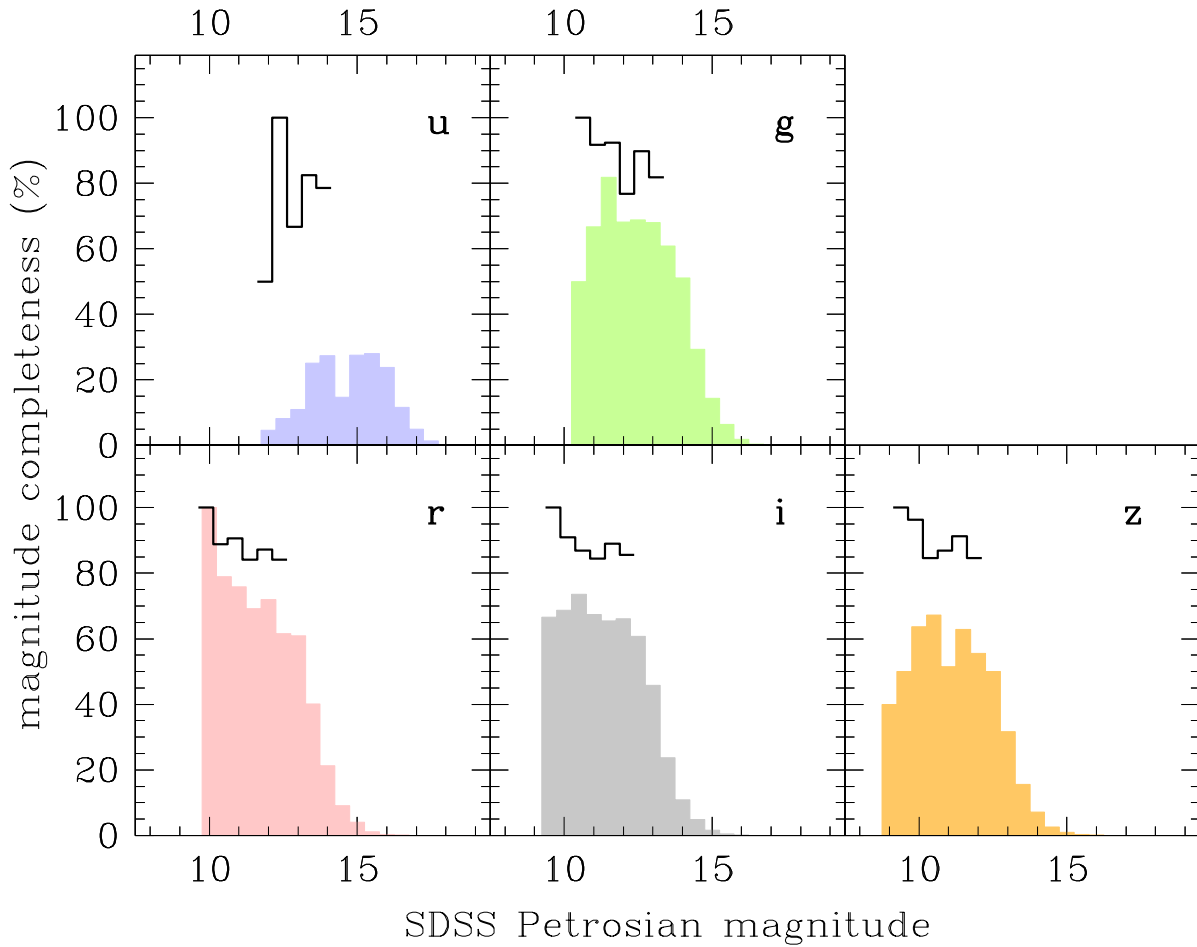


FIG. 3.3 – Histogrammes bruts de complétude photométrique du catalogue EFIGI par rapport au relevé SDSS DR4 dans les 5 filtres SDSS (histogrammes colorés), et premiers intervalles des histogrammes corrigés obtenus après élimination des fausses sources (trait plein noir).

mag pour les elliptiques (type -5), 0.12 mag pour les S0 (type -2), 0.15 mag pour les Sdm (type 8). On obtient la valeur nominale de 0.06, prédite par les simulations (ligne horizontale dans la Fig. 3.2) pour les Sbc et Sc (types 4-5).

La dispersion dans la différence de magnitude est cependant importante, d'environ 0.10 mag pour tous les types. Elle est due en partie :

- à la contamination par des objets voisins ou superposés, qui participent faiblement au calcul de la magnitude “modèle”, mais peuvent être pris en compte dans la magnitude d’ouverture ;
- aux allées de poussières qui sont partiellement corrigées dans les ajustements des modèles ;
- au morcellement des galaxies de faible brillance de surface discuté ci-dessus (principalement pour les Sdm, Sm et Im).

J’ai pu limiter ce dernier effet en ajustant le paramètre SExtractor de segmentation des sources “DE-BLEND_MINCONT”, après examen visuel des ~ 200 galaxies présentant des écarts importants dans la Fig. 3.2. L’avantage des ajustements de modèles est d’exclure les étoiles ou galaxies contaminantes lorsqu’elles sont situées dans les ailes des profils, alors que ces objets ne sont pas systématiquement exclus par la segmentation, et peuvent fortement biaiser la mesure de magnitude d’ouverture. On remarque que les écarts entre les magnitudes SDSS et SExtractor de plus de 2 magnitudes ne sont pas dus à une

contamination des magnitudes SDSS par des étoiles ou des galaxies : cela conduirait à une sur-estimation du flux dans le SDSS (soit à des différences négatives dans la Fig. 3.1).

Enfin, le calcul de la complétude photométrique du catalogue EFIGI m’a conduit à constater qu’un grand nombre de source brillantes répertoriées dans le catalogue photométrique du SDSS sont des artefacts. J’ai visualisé les 890 galaxies les plus brillantes du SDSS qui ne font pas partie de l’échantillon EFIGI, au moyen de l’outil de visualisation “Explore”. Seulement 95 galaxies proches furent identifiées avec une magnitude “Petrosian” correspondant à celle annoncée. Un tiers des 795 sources restantes étaient des objets compacts (étoiles ou galaxies lointaines). Ces objets ont des magnitude “psf” de 20 à 22 dans le filtre r , et leur magnitude “Petrosian” est contaminées par la halo d’une étoile brillante. Les deux tiers restants sont des sources “fantômes” causées par des halos d’étoiles brillantes, ou par des tracés de satellites. Le nombre de fausses sources est particulièrement élevé dans le filtre u . J’obtiens une complétude photométrique corrigée du catalogue EFIGI de $\sim 80\%$ aux magnitudes 12-14 (selon le filtre), alors que les complétude brutes étaient de $\sim 30\%$ en u , et $\sim 60 - 70\%$ en g , r , i , et z (voir Fig. 3.3).

3.2 Séquence couleur-magnitude

Le relevé SDSS avait montré une bi-modalité dans la distribution couleur-magnitude des galaxies, caractérisée par un pic correspondant aux galaxies rouges et de type “précoce” dans la séquence de Hubble, et un excès plus étalé de galaxies bleues et de type “tardif”, avec de surcroît la suggestion d’un minimum dénommé “vallée verte” pour les types intermédiaires. La première mise en évidence provenait des couleurs apparent $u - r$ en fonction de la magnitude apparente g (Strateva et al. 2001). Cet effet fut ensuite confirmé au moyen des magnitudes et couleurs absolues (Hogg et al. 2002; Blanton et al. 2003; Baldry et al. 2004) et a produit des contraintes sur les modèles semi-analytiques de formation des galaxies (Baldry et al. 2004, 2006). Un résultat similaire avait été constaté pour les galaxies du RC3 (Conselice 2006), qui montrait en outre que les galaxies de type Sa-Sab-Sb peuplent la “vallée verte”.

Récemment, van den Bergh (2007) a montré en utilisant les 1246 galaxies du “Revised Shapley-Ames Catalogue of Bright Galaxies” (Sandage & Tammann 1981) pour lesquelles le type de Hubble est connu avec précision, qu’il n’y a pas de dichotomie entre les galaxies rouges et bleues, mais plutôt une transition progressive en couleur le long de la séquence morphologique dans le diagramme couleur-magnitude (mes magnitudes utilisées sont ici photographiques[®]). C’est ce que l’on peut observer dans les deux panneaux de la Fig. 3.4, montrant la séquence couleur-magnitude obtenue pour les galaxies d’EFIGI : un glissement remarquablement continu depuis les galaxies elliptiques qui sont brillantes et rouges, jusqu’aux galaxies irrégulières qui sont les plus bleues et les moins lumineuses ; mais pas de séparation entre les populations de galaxies rouges et bleues, ni de “vallée verte”, la région de couleur intermédiaire contenant les galaxies de types Sab à Sbc. La couleur $u - r$ présente l’avantage de couvrir un grand intervalle spectral, et le domaine de longueur d’onde au repos couvert par le filtre u est sensible à l’histoire de la formation d’étoile dans les galaxies. J’obtiens cependant des résultats similaires avec les couleurs $u - g$, $g - r$, et $g - i$.

On peut se demander si le fait que l’échantillon EFIGI soit limité en diamètre apparent plutôt qu’en magnitude apparente, comme le sont les relevés existants puisse jouer un rôle dans l’absence de la bi-modalité couleur-magnitude détectée pour les galaxies plus faibles du relevé SDSS. Dans Baillard et al. (2011), nous avons montré que le catalogue EFIGI sous-échantillonne les types de Sa à Sc, et suréchantillonne les elliptiques, les spirales tardives (Sd-Sm), et les irrégulières. Ces effets vont dans le sens d’accentuer le contraste des éventuels “pics” rouge et bleu et de la “vallée verte” du diagramme couleur-magnitude. Par l’éclatement du diagramme couleur-magnitude pour chaque type morphologique, dans le panneau de droite de la Fig. 3.4, on constate que la présence de pic ou vallée dépend de la densité relative de chaque type morphologique, et dépend donc des effets de sélections affectant les différents types des échantillons du SDSS considérés.

La Fig. 3.5 montre pour comparaison les diagrammes couleur-magnitude obtenus pour les galaxies d’EFIGI lorsqu’on extrait la photométrie du catalogue DR7 du relevé SDSS. Dans le panneau de gauche de la Fig. 3.5, les magnitudes “Petrosian” sont utilisées (Petrosian 1976). On voit en comparant les Figs. 3.4 et 3.5 que les trois séquences présentent des différences notables. Dans la Fig. 3.5, les couleurs SDSS des galaxies de type Sa-Sab, Sb-Sbc, et Sc-Scd sont plus rouges de près de 0.5 magnitude que celles

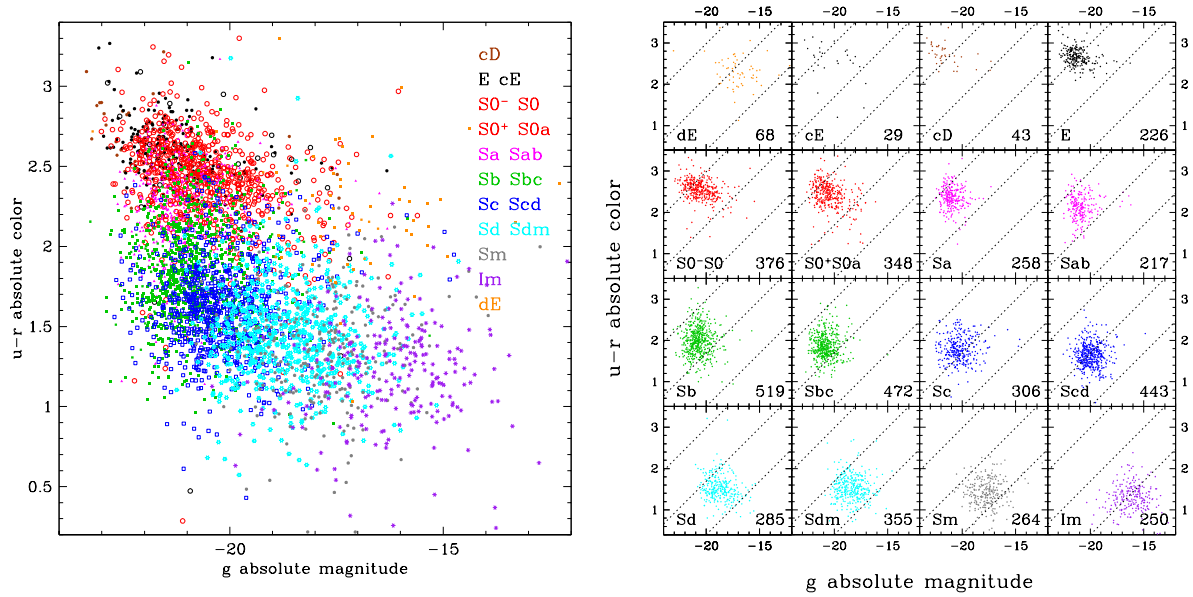


FIG. 3.4 – A gauche, la séquence de couleur absolue $u - r$ en fonction de la magnitude absolue g pour les différents types morphologiques des 4458 galaxies du catalogue EFIGI, en utilisant les magnitudes obtenues par ajustement de profils avec SExtractor. Il n’y a pas de dichotomie entre les galaxies bleues et rouges, mais plutôt un glissement progressif dans l’espace couleur-magnitude des différents types de la séquence de Hubble. Ce glissement est visible dans le graphique de droite, montrant dans chaque cadrant les différents types de Hubble, depuis les galaxies s’apparentant aux elliptiques, jusqu’aux types plus tardifs (en allant de haut en bas et de gauche à droite).

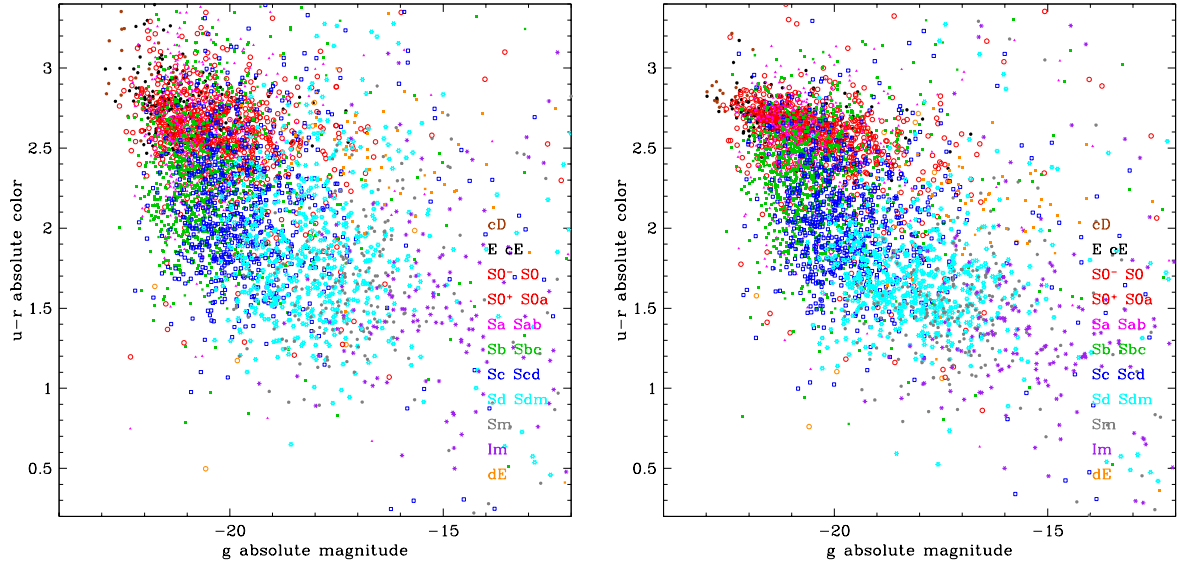


FIG. 3.5 – Même chose que dans la Fig. 3.4 pour les magnitudes extraites du relevé SDSS DR7. A gauche, il s’agit des magnitudes “Petrosian”, a droite, des magnitudes “model”, obtenues par ajustement d’un profil. On observe un comportement différent de celui de la Fig. 3.4, avec une moindre discrimination des types morphologiques.

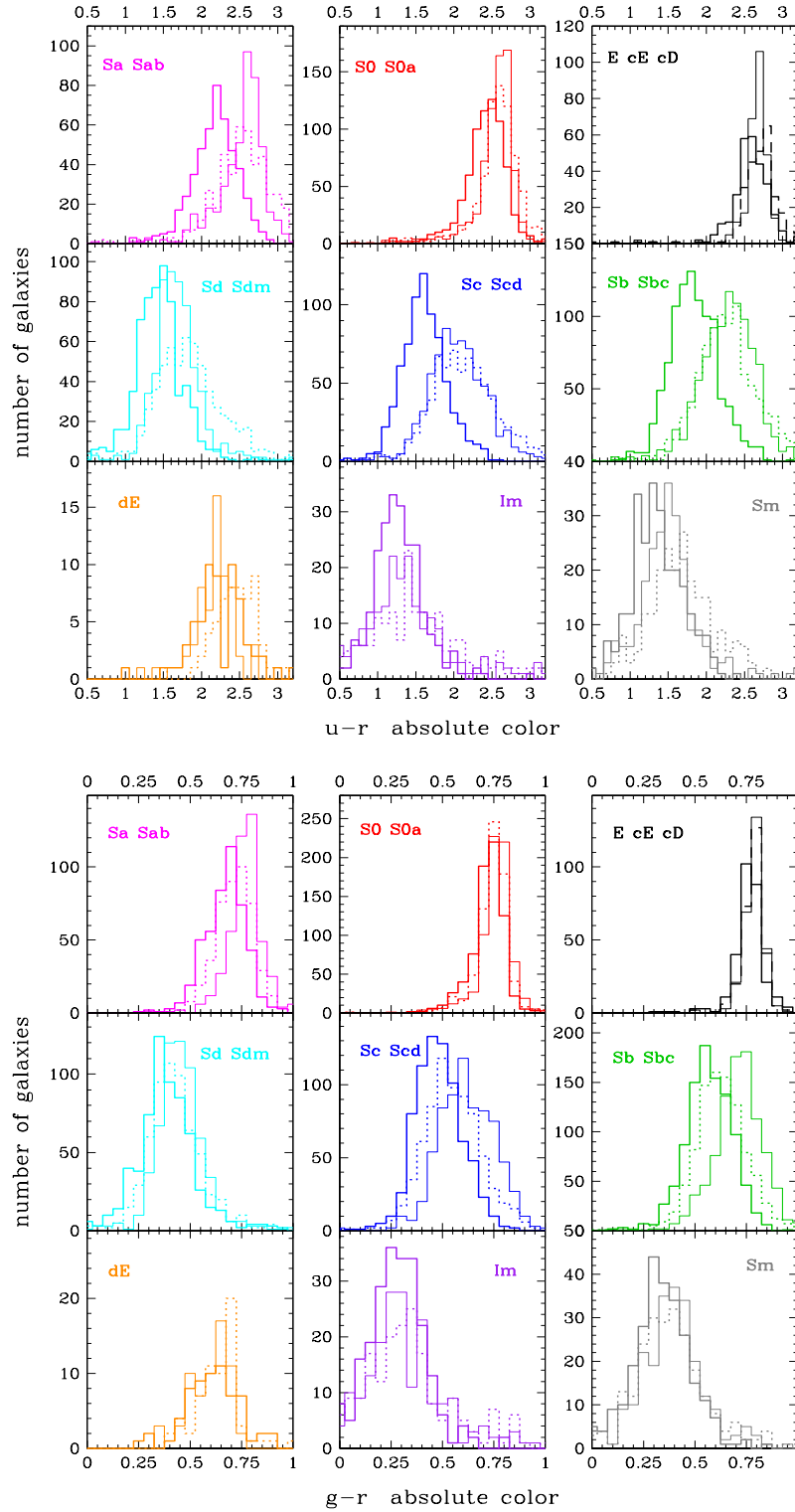


FIG. 3.6 – Les histogrammes de couleur $g-r$ pour les différents types morphologiques du catalogue EFIGI et les différentes magnitudes examinées : en trait plein et épais, les magnitudes obtenues par ajustement de modèles bulbe+disque de *SE*xtractor; en trait plein fin, les magnitude “model” du SDSS DR7; en trait pointillés, les magnitudes “Petrosian” du SDSS DR7.

obtenues avec SExtractor dans la Fig. 3.4. La séquence de couleurs des lenticulaires semble cependant plus étroite lorsqu'on utilise les magnitudes “model” du SDSS, plutôt que les magnitudes SDSS “Petrosian” ou les magnitudes SExtractor. On remarque en outre, un nombre plus faible de galaxies Im dans les deux panneaux de la Fig. 3.5 en comparaison avec la Fig. 3.4. Il en résulte des séquences couleur-magnitude plus “compactes” ou “tronquées” lorsqu'on utilise les magnitudes SDSS, et tout particulièrement pour les magnitudes “model”.

Afin de quantifier les différences entre les séquences couleur-magnitudes montrées dans les Figs. 3.4 et 3.5, on montre dans la Fig. 3.6 les histogrammes de couleurs $u - r$ pour les différents regroupements de types morphologiques considérés, et pour les trois différents types de magnitudes (SExtractor “MODEL”, SDSS “model” et SDSS “Petrosian”). On constate un rougissement de ~ 0.5 des distribution couleurs pour tous les types de Sa-Sab à Sc-Scd. On observe par ailleurs des nombres totaux de galaxies par types qui sont moindres dans les histogrammes utilisant les couleurs SDSS par rapport aux couleurs SExtractor; l'effet est présent non seulement pour les types Im, mais aussi pour les types Sb-Sbc et Sc-Scd, et pour les types Sd-Sdm et Sm avec les magnitudes “Petrosian” (mais pas avec pour magnitudes “model”). Ces galaxies manquantes sont les galaxies morcellées par la chaîne de traitement du relevé SDSS, comme décrit dans la Sect. 3.1. Ces divers résultats seront publiés dans de Lapparent & Bertin (2011a, en préparation).

3.3 Comparaison avec les types spectro-photométriques

Bien que la spectroscopie du SDSS soit disponible pour 3136 des galaxies du catalogue EFIGI, celle-ci n'est pas utilisable pour contraindre le contenu stellaire des objets, car les galaxies d'EFIGI sont des objets proches et par conséquent étendus bien au delà des 2 secondes d'arc des fibres utilisées pour la spectroscopie (voir Sect. 3.1). Il est par conséquent nécessaire d'utiliser la photométrie des galaxies pour déterminer les types spectraux.

J'ai ainsi utilisé à nouveau le code ZPEG afin de calculer les types spectro-photométriques des galaxies d'EFIGI, en utilisant les magnitudes SExtractor “MODEL”. J'utilise les mêmes scénarios et la même contrainte d'âge à $z = 0$ que dans la Sect. 4.1; la limite supérieure et le pas en décalage spectral sont cependant modifiés à 0.1 et 0.0005 resp. J'exclus de ce calcul les ~ 200 galaxies d'EFIGI ayant une contamination importante (attribut `Contamination` ≤ 0.5), et j'utilise les décalages vers le rouge spectroscopiques, afin d'obtenir le meilleur ajustement des scénarios.

Je montre dans la Fig. 3.7 la comparaison entre les types morphologiques et les types spectro-photométriques fournis par ZPEG, parmi: E, S0, Sa, Sb, Sbc, Sc, Sd, Im, et Starburst. Dans le graphe, on attribue à chacun de ces scénarios le type morphologique numérique T correspondant, sauf pour le scénario Starburst, qui est placé à $T = 10$, correspondant au type morphologique Im. On remarque une grande dispersion des types, avec des effets systématiques, plaçant les moyennes et médianes de types ZPEG au dessous des types morphologiques.

Le décalage systématique des types ZPEG par rapport aux types morphologiques est causé principalement par l'inclinaison des galaxies. Celle-ci est indiquée par des symboles de couleurs différentes selon les niveaux de l'attribut, 0 correspondant à une galaxie de face, et 4 à une galaxie vue par la tranche. Par exemple les galaxies de type morphologique Sa ($T = 1$) sont classées principalement en E, S0 et même E quand l'inclinaison augmente. J'attribue cet effet au rougissement interne des galaxies par les poussières qu'elles contiennent, et qui varie avec l'inclinaison. Driver et al. (2007) ont montré à partir des 10 095 galaxies du catalogue observé “Millennium” (à ne pas confondre avec les simulations numériques “Millennium”) que les poussières contenues dans les disques des galaxies atténuent les magnitudes B des disques et des bulbes associés jusqu'à 1 et 2.5 mag. resp. en fonction de leur inclinaison; 1/3 de la lumière émise par les disques dans la bande B , et 2/3 de celle émise par les bulbes serait absorbée par les poussières. On observe aussi un affaiblissement des magnitudes absolues des galaxies du catalogue EFIGI, atteignant 0.5 magnitude pour les galaxies spirales précoces (Sa-Scd) dans les bandes u et g , et pouvant atteindre 1 à 2 mag. pour les disques de ces galaxies.

On voit dans la Fig. 3.7 que cet effet de rougissement est important jusqu'aux types morphologiques Sb, correspondant à un étalement jusqu'au type ZPEG E, et s'amointrit pour les galaxies de type Sc ou

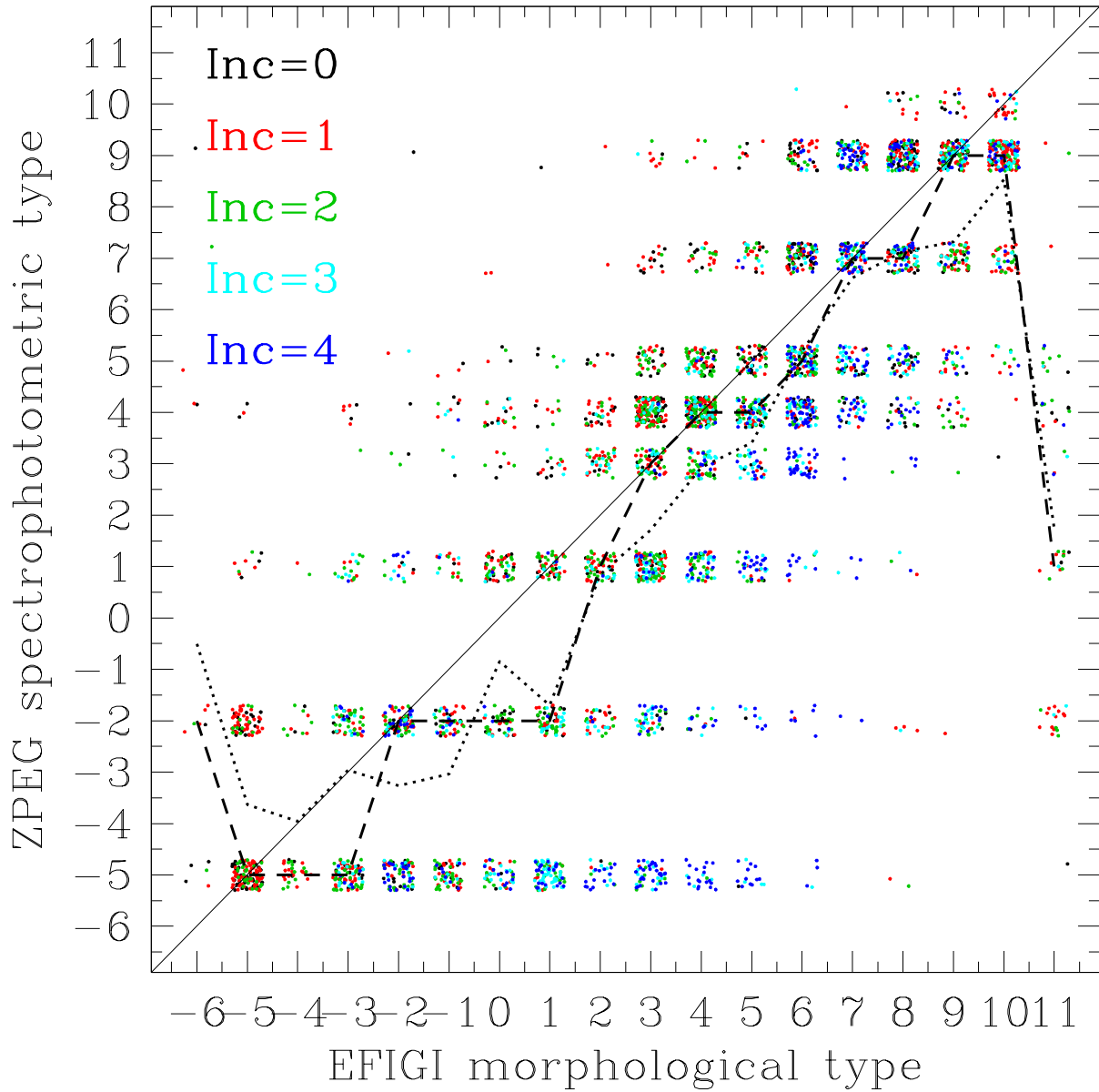


FIG. 3.7 – Comparaison des types spectraux morphologiques du catalogue EFIGI avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie SExtractor dans les bandes ugriz, et en utilisant les décalages vers le rouge spectroscopiques. La ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types morphologique, et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points, et la couleur des points dépend de l'inclinaison sur le ciel ou de l'élongation (pour les type E, cE, cD, Im et cE) de la galaxie. Les types morphologiques numériques correspondent à cE (-6), E (-5), cD (-4), S0⁻ (-3), S0 (-2), S0⁺ (-1), S0a (0), Sa (1), Sab (2), Sb (3), Sbc (4), Sc (5), Scd (6), Sd (7), Sdm (8), Sm (9), Im (10), dE (11).

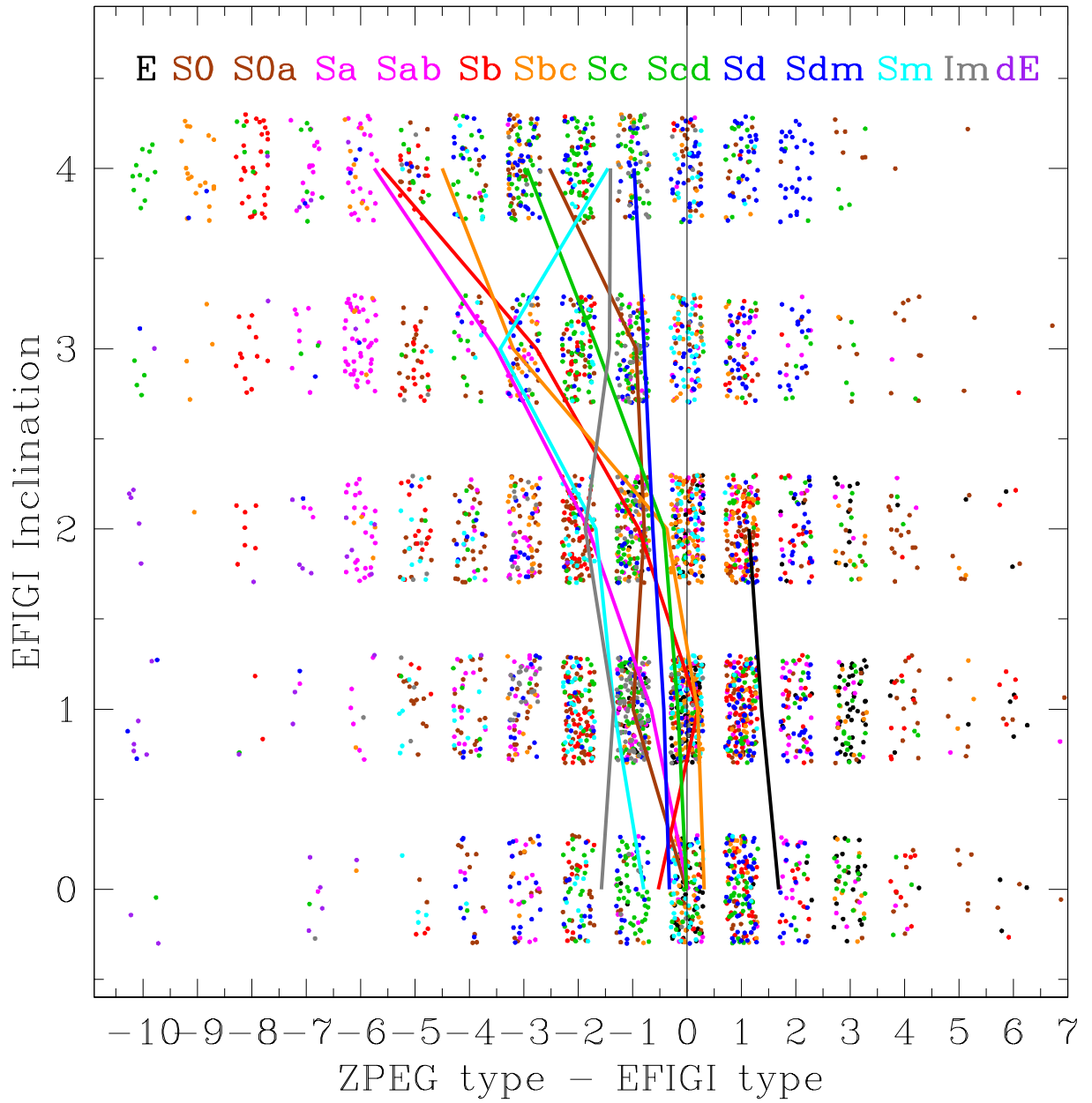


FIG. 3.8 – Comparaison des types spectraux morphologiques du catalogue EFIGI avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie SExtractor dans les bandes ugriz, et en utilisant les décalages vers le rouge spectroscopiques. La ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types morphologique, et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points, et la couleur des points dépend de l'inclinaison sur le ciel ou de l'élongation (pour les type E, cE, cD, Im et cE) de la galaxie. Les types morphologiques numériques correspondent à cE (-6), E (-5), cD (-4), S0⁻ (-3), S0 (-2), S0⁺ (-1), S0a (0), Sa (1), Sab (2), Sb (3), Sbc (4), Sc (5), Scd (6), Sd (7), Sdm (8), Sm (9), Im (10), dE (11).

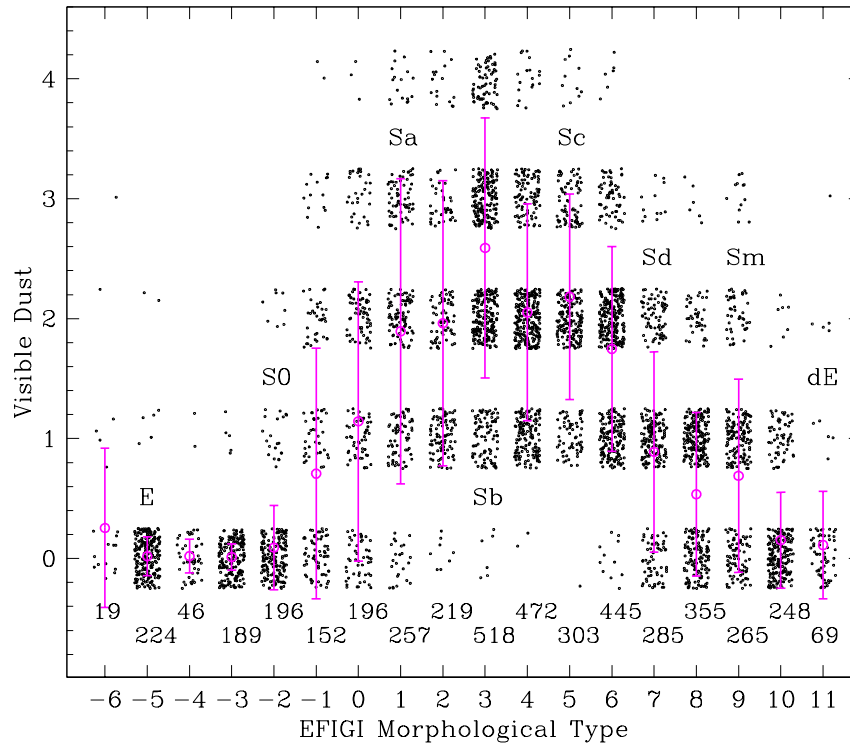


FIG. 3.9 – Distribution de l’attribut caractérisant la quantité de “poussière visible” dans les galaxies du catalogue EFIGI. La valeur 0 correspond à aucune poussière visible, et la valeur 4 à la quantité maximale détectée dans l’échantillon.

plus tardif. On remarque aussi que le type dE ne figurant pas parmi les scénarios utilisés, ces galaxies sont classées comme des types S0, Sa, Sb ou Sbc, suivant l’élongation des objets.

La Fig. 3.8 montre quantitativement le décalage entre le type ZPEG et le type morphologique en fonction de l’attribut d’inclinaison: pour tous les types de lenticulaires et pour toutes les spirales jusqu’à Scd, on voit un accroissement de la différence de type vers les valeurs négatives pour les plus grandes inclinaisons, avec un effet le plus marqué pour les types Sa, Sab et Sb qui sont les plus riches en poussière. La Fig. 3.9 montre la répartition des types EFIGI selon les 5 valeurs de l’attribut caractérisant la quantité de “poussière visible”. En revanche, pour les types E, Sd, Sdm, Sm et Im, l’attribut *Inclinaison* mesure l’élongation des objets (rapport d’axes), et la différence entre les types morphologiques et la Fig. 3.8 spectrophotométrique ne montre pas de variation avec l’élongation.

3.4 Fonctions de luminosité par type

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology IV. Luminosity functions along the Hubble sequence”, **de Lapparent, V.**, Bertin, E., Baillard, B., en préparation.

Le catalogue EFIGI offre l’opportunité sans précédent de mesurer les fonctions de luminosité par type de Hubble à partir d’un grand échantillon statistique. En effet, nous avons vu dans les Sects. 5.3 et 5.5 que ces fonctions ne sont connues que dans l’Univers local (dans les amas de la Vierge et du Centaure), pour un petit nombre de galaxies, et à partir de magnitudes photographiques.

Le panneau de gauche de la Fig. 3.10 montre la fonction de luminosité obtenue pour l’ensemble de l’échantillon EFIGI, tous types confondus, au moyen des magnitudes “MODEL” de SExtractor. J’utilise

ici la méthode de Efstathiou et al. (1988) dite “Step-Wise Maximum-Likelihood”, qui corrige des inhomogénéités spatiales prenant en compte uniquement des rapports de nombre de galaxies dans un même volume. C’est une méthode itérative qui converge pour l’échantillon EFIGI en 10 à 50 itérations, selon la taille du sous-échantillon considéré. Je corrige en outre de l’incomplétude en magnitude apparente, qui décroît rapidement à $g > 14$, en interpolant le comportement en loi de puissance des comptages de galaxies : dans l’intervalle $10 \leq g \leq 14$, les comptages par pas de 0.2 mag. sont bien ajustés par la fonction $dN(g) = 10^{0.401g-3.061} dg/0.2$.

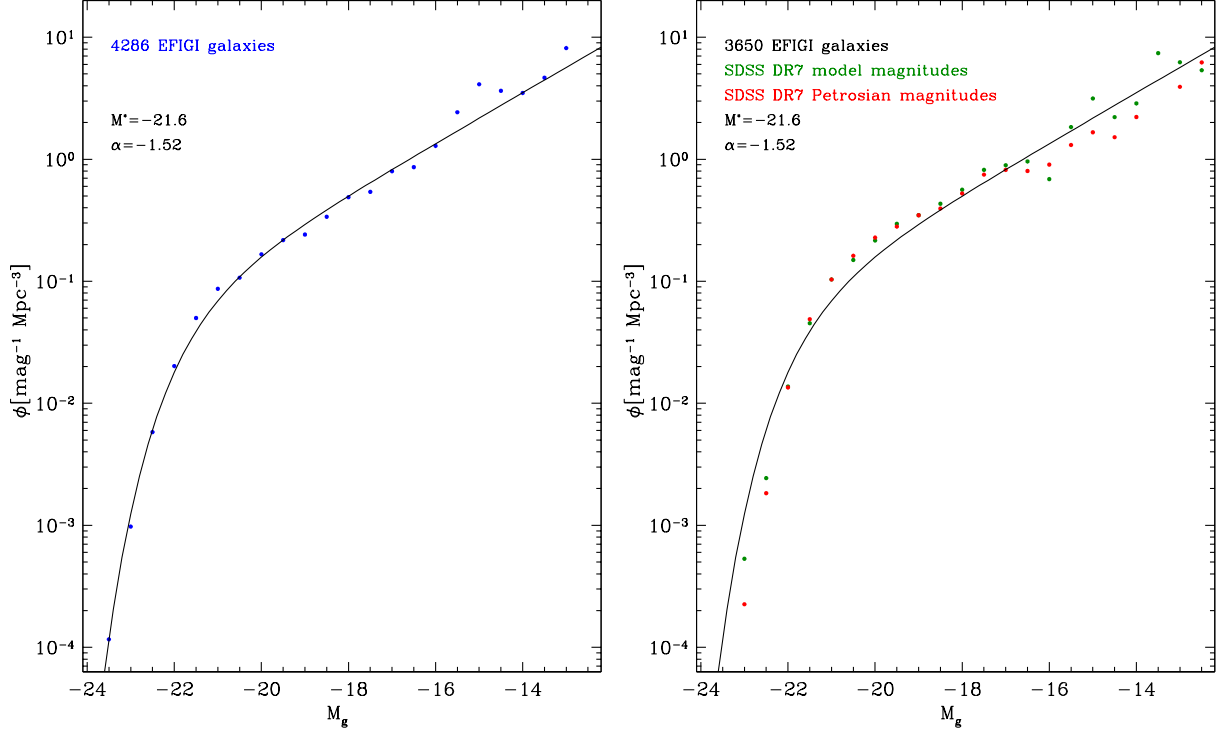


FIG. 3.10 – *A gauche, et en bleu : la fonction de luminosité pour l’ensemble du catalogue EFIGI dans la bande g, avec les magnitudes “MODEL” de SExtractor, ainsi que la fonction de Schechter ajustée (les paramètres de cette fonction, et le nombre de galaxies utilisées sont indiqués dans le graphe). A droite, les fonctions de luminosité globales obtenues avec les magnitude SDSS DR7 “model” (en vert) et “Petrosian” (en rouge), comparées avec la loi de Schechter ajustée dans le panneau de gauche.*

La fonction de luminosité totale de l’échantillon EFIGI est proche d’une fonction de Schechter (1976), dont le formalisme est

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha e^{-\frac{L}{L^*}} d\left(\frac{L}{L^*} \right), \quad (3.1)$$

où L^* est la fonction de luminosité caractéristique. Si l’on ré-écrit cette formule en terme de magnitude on obtient :

$$\begin{aligned} \phi(M)dM &= 0.4 \ln 10 \phi^* e^{-X} X^{\alpha+1} dM, \\ \text{avec} \quad X &\equiv \frac{L}{L^*} = 10^{0.4(M^*-M)}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

où M^* est la magnitude caractéristique.

Les paramètres de la fonction de Schechter ajustée à la fonction de luminosité totale du catalogue EFIGI (panneau de gauche, Fig. 3.10), sont $M^* = -21.6$ et $\alpha = -1.52$; des mesures de “bootstrap”, Ling et al. 1986, devront être effectuées afin d’obtenir les marges d’erreur sur les points de mesure de la méthode SWML et sur les ajustements de Schechter. Par comparaison, on montre dans le panneau de droite de la Fig. 3.10 les fonctions de luminosité totales obtenues lorsqu’on utilise pour les galaxies

EFIGI les magnitudes “model” et “Petrosian” du par le catalogue SDSS DR7. On observe par rapport à la fonction de Schechter ajustée dans le panneau de gauche un manque de galaxies aux magnitudes brillantes et aux magnitudes faibles, que ce soit pour les magnitudes “model” ou “Petrosian” du SDSS. Ces différences sont causées par les erreurs de photométrie décrites dans Sect. 3.1 : le flux des galaxies brillantes est sous-estimé, et le morcellement des galaxies faibles (et donc tardives) tend à les exclure de l'échantillon.

L'ajustement d'une fonction de Schechter à la fonction de luminosité globale calculée avec les magnitudes “model” du SDSS (panneau de droite) donne $M^* = -21.0$ et $\alpha = -1.39$, soit un décalage en magnitude caractéristique de 0.6 magnitude et une pente plus plate de 0.13. Ainsi les erreurs de photométrie des du relevé SDSS ont des implications sur les mesures statistiques qui en sont déduites.

En outre, on remarque que Blanton et al. (2001) avaient obtenu dans la bande g à partir de $\sim 10\,000$ galaxies du relevé SDSS à $z \sim 0.01 - 0.2$, un M^* plus faible d'une magnitude et demi (-20.04 ± 0.04) et une pente encore plus plate ($\alpha = 1.26 \pm 0.05$). Les mesures plus récentes publiées par Blanton et al. (2003) pour $\sim 150\,000$ galaxies du catalogue SDSS indiquent une pente encore plus plate de $\alpha = -0.89 \pm 0.03$, et une magnitude de référence $M^* = -19.39 \pm 0.02$, mais qui ne peut pas être comparée directement avec les fonctions de luminosité calculées ici pour le catalogue EFIGI : ces mesures furent obtenues dans les filtres décalés à $z = 0.1$. Blanton et al. (2003) attribut les différences avec les mesures précédentes de Blanton et al. (2001) aux effets d'évolution liées à ces différents référentiels en décalage vers le rouge.

Il est étonnant qu'il y ait de telles différences avec la fonction de luminosité totale du catalogue EFIGI. L'essentiel des galaxies utilisées dans les mesures de Blanton et al. (2001) et Blanton et al. (2003) ont des magnitudes $r \gtrsim 17$, au delà des magnitudes de l'échantillon EFIGI pour lesquelles nous avons mis en évidence les problèmes de photométrie (Sect. 3.1). Cependant, les écarts vont dans le même sens, et les biais de la photométrie pourraient expliquer une partie de ce qui était interprété par ces auteurs comme des effets d'évolution.

Lorsqu'on calcule les fonctions de luminosité séparément pour les différents types morphologiques, des corrélations marquées apparaissent entre les formes des fonctions et le type de Hubble. Celles-ci sont montrées dans le panneau de gauche de la Fig. 3.11. A noter qu'à ce stade de l'analyse, la normalisation absolue des fonctions de luminosité de l'échantillon EFIGI n'ayant pas été effectuée, seules les formes des différentes courbes peuvent être comparées.

Les fonctions de luminosité par type affichent une diminution des magnitudes caractéristiques le long de la séquence de Hubble. En outre, on observe pour les types E, S0 et les spirales Sa à Sc-Scd des fonctions de luminosité en cloche, c'est-à-dire qui décroissent à forte et faible magnitude. En revanche, pour les spirales Sd et plus tardives, ainsi que les types Im et dE, les fonctions de luminosité sont croissantes aux faibles magnitudes. La forme des fonctions obtenues est en accord avec les fonctions prédites à partir des mesures locales (de Lapparent 2003), et démontre l'intérêt de faire des mesures par type morphologique. C'est la première fois que ces fonctions sont mise en évidence à partir d'un relevé systématique avec photométrie CCD.

Par comparaison, on montre dans le panneau de droite de la Fig. 3.11 les fonction de luminosité par type EFIGI obtenues en utilisant les magnitudes “model” du SDSS DR7. On observe pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu'à Scd ;

- le déficit de galaxies brillantes qui se traduit par un chute de la fonction de luminosité aux magnitudes brillantes localisée à des valeurs ~ 0.5 mag. moins brillantes ;
- le réhaussement du côté des magnitudes faibles à cause de la contamination par les objets morcelés et les objets dont le fond de ciel est surestimé (voir Sect. 3.1)

Ces derniers effets causent l'extension aux faibles magnitudes des fonctions de luminosité pour les galaxies de types Sd-Sdm, Sm, Im et dE, lorsqu'on utilise les magnitudes SDSS (panneau de droite de la Fig. 3.11). L'absence de signal aux magnitudes plus brillantes que -18.5 pour les galaxies Irrégulières est particulièrement frappante dans le panneau de droite, alors que des objets jusqu'à -20.5 , soit 2 magnitudes plus brillantes sont détectées lorsqu'on utilise les magnitudes “MODEL” de SExtractor (panneau de gauche de la Fig. 3.11).

J'examine maintenant les biais dans les mesures des fonctions de luminosité causés par le mélange des types morphologiques lorsqu'on effectue une séparation par couleur ou par type spectral, et que j'avais

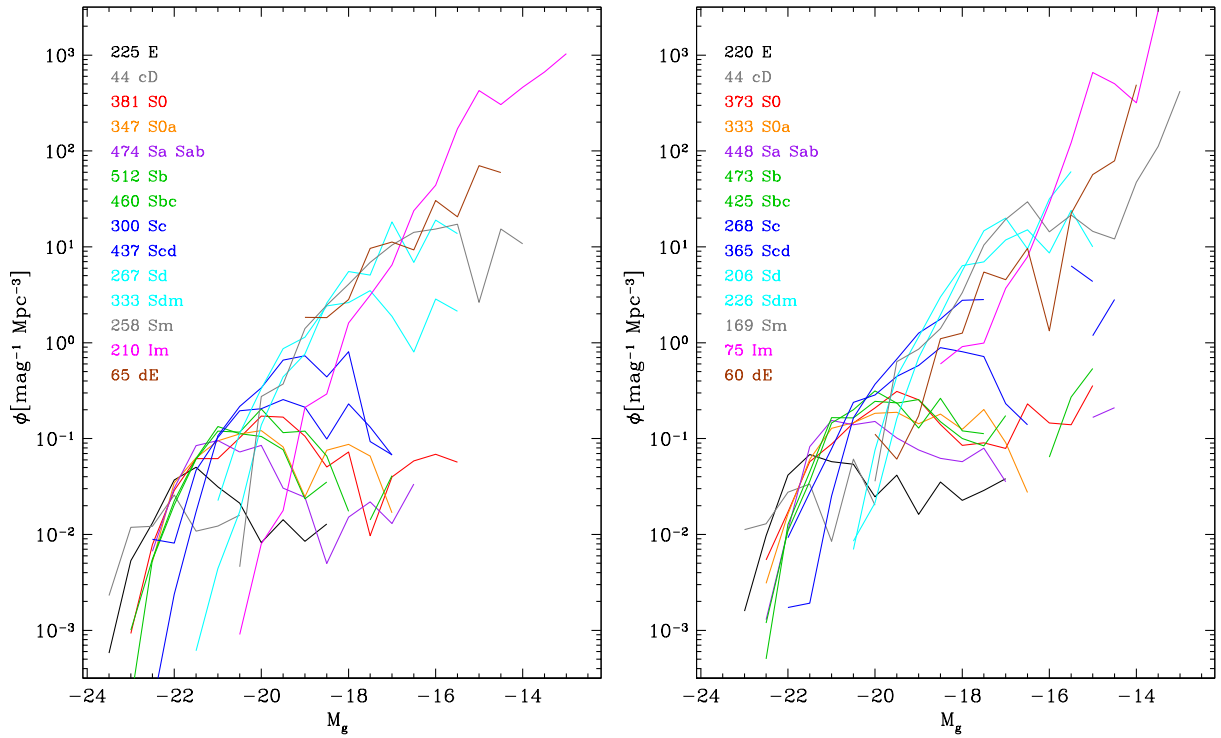


FIG. 3.11 – *A gauche* : les fonctions de luminosité pour les différents types morphologiques du catalogue EFIGI dans la bande g du relevé SDSS (magnitudes “MODEL” de SExtractor) ; on observe la décroissance de la luminosité caractéristique vers les types plus tardifs, le comportement en cloche pour les galaxies spirales jusqu’à Scd, et la croissance aux faibles luminosités pour les types les plus tardifs. *A droite* : la même figure en utilisant les magnitudes “model” du SDSS DR7.

pointé dans les Sects. 5.3 et 5.5. Pour cela, je montre dans le panneau de gauche de la Fig. 3.12 les fonctions obtenues pour les 5 intervalles de couleur absolue $M_g - M_r$ utilisés par Blanton et al. (2001). La décroissance à faible magnitude des fonctions de luminosité pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu’à Sc disparaît : même lorsqu’on considère les 2 intervalles de magnitude les plus rouges. En outre, seule la fonction de luminosité des galaxies les plus bleues exhibe un affaiblissement des magnitudes les plus brillantes détectées. Mais celles-ci sont 1 magnitude plus brillantes (~ -21.5) que dans la fonction de luminosité des galaxies irrégulières (~ -20.5), montrée dans la Fig. 3.11.

On peut aisément expliquer ce comportement en examinant le panneau de droite de la Fig. 3.12, montrant comment les types morphologiques des galaxies d’EFIGI se répartissent dans les 5 intervalles de couleur considérés dans le panneau de gauche. L’intervalle de couleur le plus bleu, contient non seulement des galaxies irrégulières, mais aussi des galaxies de type Sm et Sdm. Quant à l’intervalle suivant en couleur, $0.25 \leq M(g-r) \leq 0.42$, il contient des nombres équivalents de galaxies de types Im, Sm et Sdm, et un peu moins de types Sd et Scd. L’intervalle central de couleur $0.42 \leq M_g - M_r \leq 0.58$ contient tous les types depuis les Sb jusqu’aux dE, alors que le panneau de gauche de la Fig. 3.12 indique des fonctions de luminosité distinctes pour ces différents types. L’intervalle $0.58 \leq M_g - M_r \leq 0.74$ est le plus contaminé, car il contient des galaxies de *tous* les types morphologiques. Le contenu en types morphologiques de l’intervalle de couleur le plus rouge, $0.74 \leq M_g - M_r \leq 1.30$, diffère par la très faible contribution des types Sd à dE, contient les galaxies les plus rouges parmi les types E à Scd. Ainsi, les différents intervalles de couleurs scindent les différents types morphologiques par couleur, sans parvenir à séparer les types individuels. On remarque que même l’intervalle de couleur le plus rouge ne parvient pas mesurer la fonction de luminosité des galaxies elliptiques, qui s’interrompt à $M_g \simeq -18.5$ dans la Fig. 3.11, alors qu’on observe une extension jusqu’à $M_g \simeq -16$ pour la composante la plus rouge dans la Fig. 3.12.

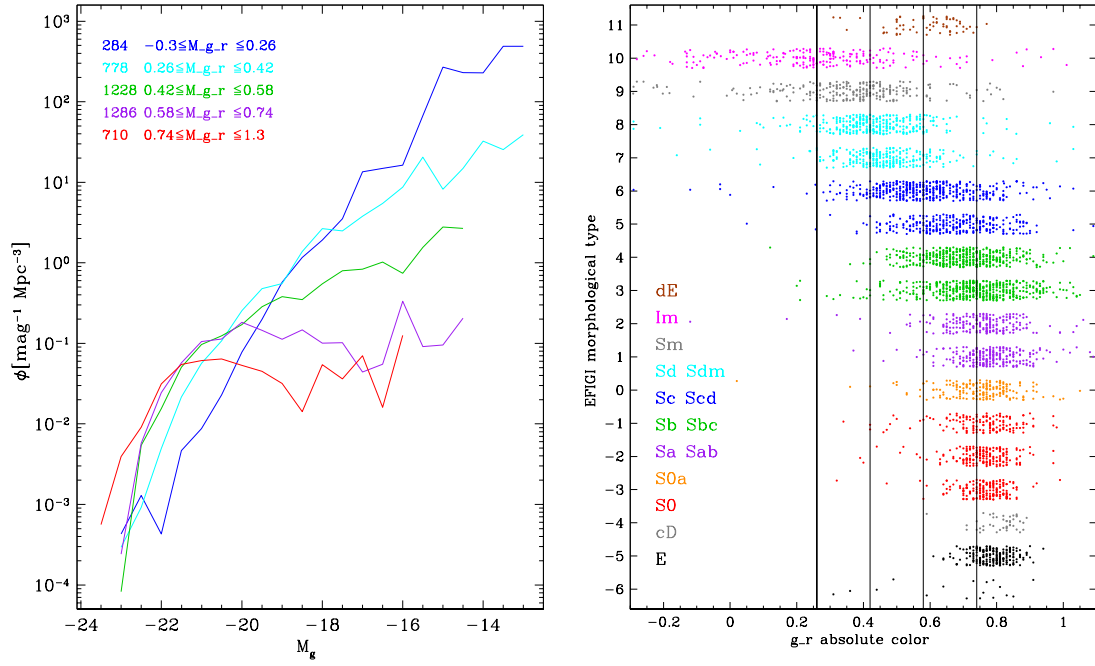


FIG. 3.12 – A gauche : les fonctions de luminosité pour les différents intervalles de couleurs absolue $g - r$ indiqués (utilisant les magnitudes “MODEL” de SExtractor). A droite : la distribution des types morphologiques pour les cinq intervalles de couleurs, avec le même code de couleur par type que dans la Fig. 3.11. On observe le mélange des types morphologiques et la perte d’information qui en résulte sur les fonctions de luminosité intrinsèques.

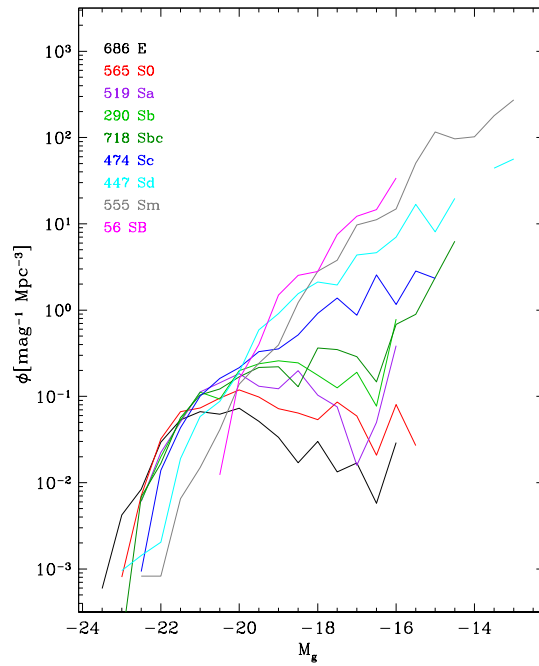


FIG. 3.13 – Les fonctions de luminosité pour les différents types spectro-photométriques calculés par ZPEG pour les galaxies du catalogue EFIGI.

On obtient des résultats similaires lorsqu'on calcule les fonctions de luminosité par type spectro-photométrique calculés avec ZPEG. Ces fonctions sont montrées dans la Fig. 3.13, et l'on observe des effets similaires à ceux de la Fig. 3.12. La dispersion entre les types spectro-photométriques et les types morphologiques est visible dans la Fig. 3.7 (Sect. 3.3). Tous les résultats énoncés dans cette Sect. sont aussi constatés dans les quatre autres filtres du SDSS. L'ensemble des résultats sera publié dans de Lapparent & Bertin (2011b, en préparation).

3.5 Couleurs des bulbes et disques

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology III. Disk and bulge bi-modality along the Hubble sequence”, de **Lapparent, V.**, Bertin, E., en préparation.

Les décompositions des profils d'environ 10 095 galaxies avec $B < 20$ dans le catalogue “Millennium” avaient suggéré que l'apparente bi-modalité est le résultat d'une nette séparation entre les couleurs des bulbes et des disques des galaxies (Allen et al. 2006). Mais cette analyse manque de robustesse dans l'ajustement des profils à cause de dégénérescences entre les composantes (en partie liées au choix peu contraignant d'un profil de Sérsic pour les bulbes), ainsi que de l'absence d'une classification morphologique précise (galaxies classées en E/S0, Sabc, et Sd/Irr/Pec).

Grâce à la qualité des ajustements de profil et le niveau de précision du type de Hubble et des attributs morphologiques pour le catalogue EFIGI, nous avons pu établir les séquences couleur-magnitude pour les bulbes et les disques de la majorité des objets. Dans les Figs. 3.14 et 3.15 on voit clairement le comportement distinct des bulbes qui ont majoritairement des couleurs proches de celles des galaxies elliptiques, alors que les disques décrivent tout l'intervalle de couleur depuis la couleur rouge des elliptiques, jusqu'à la couleur très bleue des irrégulières.

Ces résultats contrastent de façon marquée avec les résultats de Balcells & Peletier (1994), qui trouvèrent un bleuissement des bulbes de 18 spirales précoces (non affectées par l'extinction) par rapport aux couleurs des elliptiques. En ajustant des profils dans la partie excluant la bande de poussière pour 30 galaxies spirales précoces inclinées, Peletier & Balcells (1996) mesurèrent des couleurs similaires pour les bulbes et disque des ces galaxies. Par l'ajustement des profils des 10 095 galaxies du catalogue “Millennium” par un bulbe de type “Sérsic” ajouté à un disque exponentiel, au moyen de GIM2D (Simard 1998), Cameron et al. (2009) obtinrent une étonnante corrélation entre les couleurs $u - r$ des bulbes et disques sur un intervalle de 2 magnitudes, après une correction de l'atténuation par la poussière. Les différences avec les mesures effectuées sur le catalogue EFIGI illustrent la difficulté des ajustements de profils, et l'importance d'une bonne prise en compte de la réponse impulsionnelle.

Il est intéressant de remarquer que dans la Fig. 3.14 les bulbes des types Sb, Sbc, Sc, Scd montrent un rougissement par rapport à la couleur de référence ($g - r = 0.75$). On remarque que ces types présentant une forte quantité de poussière, comme indiqué dans la Fig. 3.9 (voir Sect. 3.3) au moyen de l'attribut EFIGI *Visible Dust*. L'effet est cependant présent lorsque l'on examine séparément les galaxies de ce type avec peu ou pas de poussière visible, car la poussière évaluée par l'attribut EFIGI est celle du disque. Cependant, on observe dans la Fig. 3.16 que ce rougissement des bulbes augmente pour les galaxies présentant un rapport Bulbe/Total décroissant. Cela est peut-être cohérent avec le fait que le rougissement par la poussière s'accompagne d'une extinction. Mais il est aussi possible que les détails de la modélisation bulbe+disque pour les galaxies ayant une faible contribution du bulbe aient un impact sur les couleurs calculées pour les bulbes dans ces objets. Enfin, on remarque que les bulbes des galaxies de type Sbc et plus tardives sont principalement des “pseudo-bulbes”, qui peuvent avoir des profils exponentiels et qui auraient été formés par accrétion lente de matière provenant du disque, plutôt que par relaxation violente selon le modèle des elliptiques massives (Kormendy & Kennicutt 2004). L'ensemble de ces considérations appelle à poursuivre cette étude en utilisant des profils autres que la loi “de Vaucouleurs” pour les bulbes. Ces résultats seront approfondis et discutés dans de Lapparent & Bertin (2011a, en préparation).

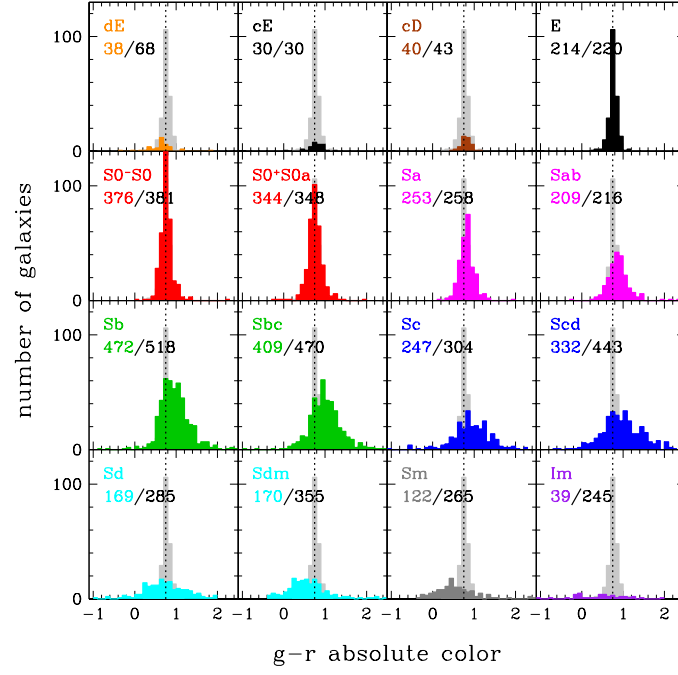


FIG. 3.14 – Distributions des couleurs $g-r$ pour les bulbes des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil en $r^{1/4}$ convolué avec la réponse impulsionnelle, en fonction du type de Hubble. L'histogramme grisé réplique celui obtenu en haut à droite pour les galaxies elliptiques.

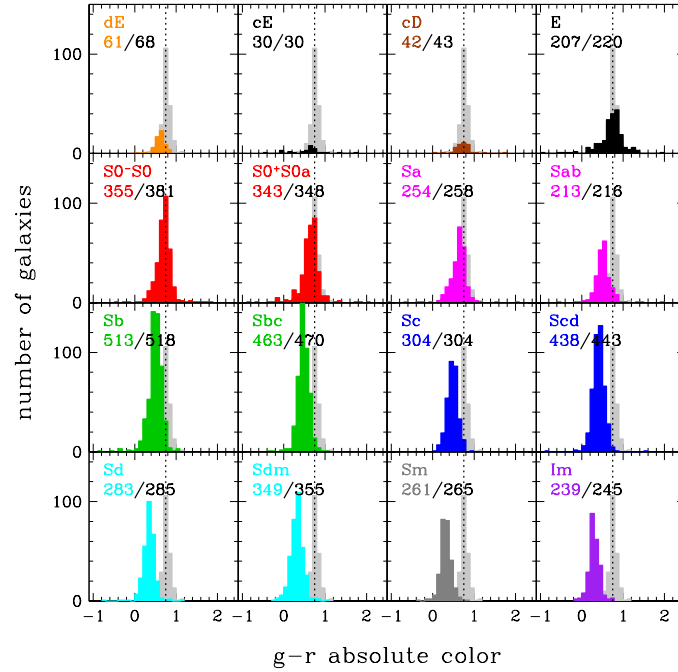


FIG. 3.15 – Distributions des couleurs $g-r$ pour les disques des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil exponentiel convolué avec la réponse impulsionnelle, en fonction du type de Hubble. L'histogramme grisé réplique celui obtenu dans la Fig. 3.14 pour les bulbes des galaxies elliptiques.

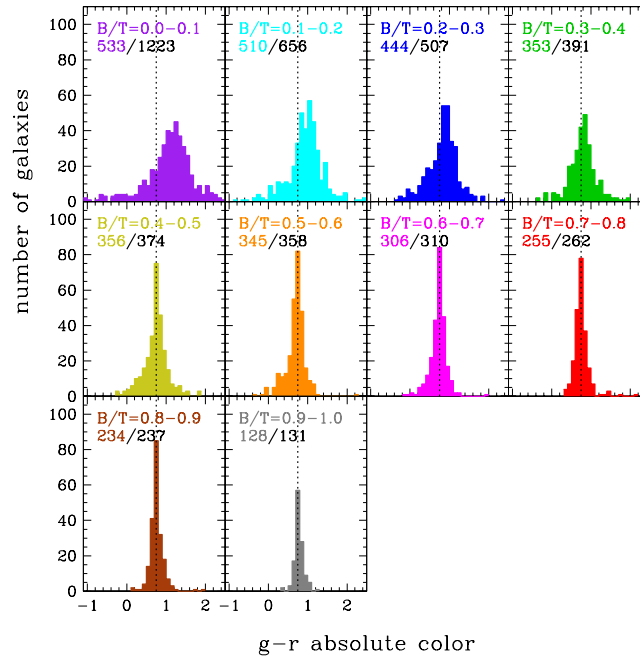


FIG. 3.16 – Distributions des couleurs $g - r$ pour les bulbes des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil en $r^{1/4}$ convolué avec la réponse impulsionnelle, en fonction du rapport Bulbe/Total. La ligne verticale en pointillés indique dans chaque cadran la couleur médiane des galaxies elliptiques (avec un rapport Bulbe/Total > 0.9).

Références

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- Abell, G. O. 1959, Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific, 8, 121
- Abraham, R. G., Valdes, F., Yee, H. K. C., & van den Bergh, S. 1994, *ApJ*, 432, 75
- Abraham, R. G., van den Bergh, S., & Nair, P. 2003, *ApJ*, 588, 218
- Allen, P. D., Driver, S. P., Graham, A. W., et al. 2006, *MNRAS*, 371, 2
- Baillard, A. 2008, Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies (Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications)
- Baillard, B., Bertin, E., de Lapparent, V., et al. 2011, *A&A* in press
- Balcells, M. & Peletier, R. F. 1994, *AJ*, 107, 135
- Baldry, I. K., Balogh, M. L., Bower, R. G., et al. 2006, *MNRAS*, 373, 469
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., et al. 2004, *ApJ*, 600, 681
- Barazza, F. D., Binggeli, B., & Jerjen, H. 2002, *A&A*, 391, 823
- Barazza, F. D., Jogee, S., & Marinova, I. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 396, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, ed. J. G. Funes & E. M. Corsini, 351–+
- Bertin, E. 2010, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Blanton, M. R., Dalcanton, J., Eisenstein, D., et al. 2001, *AJ*, 121, 2358
- Blanton, M. R., Eisenstein, D., Hogg, D. W., Schlegel, D. J., & Brinkmann, J. 2005, *ApJ*, 629, 143
- Blanton, M. R., Hogg, D. W., Bahcall, N. A., et al. 2003, *ApJ*, 592, 819
- Buta, R. 1995, *ApJS*, 96, 39
- Buta, R., Laurikainen, E., Salo, H., Block, D. L., & Knapen, J. H. 2006, *AJ*, 132, 1859
- Buta, R. J., Corwin, H. G., & Odewahn, S. C. 2007, *The de Vaucouleurs Atlas of Galaxies*, ed. Buta, R. J., Corwin, H. G., & Odewahn, S. C. (Cambridge University Press)
- Cameron, E., Driver, S. P., Graham, A. W., & Liske, J. 2009, *ApJ*, 699, 105
- Conselice, C. J. 1997, *PASP*, 109, 1251
- Conselice, C. J. 2003, *ApJS*, 147, 1
- Conselice, C. J. 2006, *MNRAS*, 373, 1389
- Conselice, C. J., Bershadsky, M. A., & Jangren, A. 2000, *ApJ*, 529, 886
- Damjanov, I., McCarthy, P. J., Abraham, R. G., et al. 2009, *ApJ*, 695, 101
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Baillard, B., & Bertin, E. 2011, *A&A* in press
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., & Corwin, H. G. 1976, 2nd reference catalogue of bright galaxies containing information on 4364 galaxies with reference to papers published between 1964 and 1975 (University of Texas Monographs in Astronomy, Austin: University of Texas Press, 1976)
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., et al. 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (Volume 1-3, XII, 2069 pp. 7 figs.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York)*
- Debattista, V. P., Mayer, L., Carollo, C. M., et al. 2006, *ApJ*, 645, 209
- Driver, S. P., Popescu, C. C., Tuffs, R. J., et al. 2007, *MNRAS*, 379, 1022
- Efstathiou, G., Ellis, R. S., & Peterson, B. A. 1988, *MNRAS*, 232, 431

- Hogg, D. W., Blanton, M., Strateva, I., et al. 2002, *AJ*, 124, 646
- Kormendy, J. 1979, *ApJ*, 227, 714
- Kormendy, J. & Kennicutt, Jr., R. C. 2004, *ARA&A*, 42, 603
- Ling, E. N., Barrow, J. D., & Frenk, C. S. 1986, *MNRAS*, 223, 21P
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., et al. 2008, *MNRAS*, 389, 1179
- Lisker, T. 2008, *ApJS*, 179, 319
- Lisker, T., Grebel, E. K., & Binggeli, B. 2006, *AJ*, 132, 497
- Naim, A., Ratnatunga, K. U., & Griffiths, R. E. 1997, *ApJ*, 476, 510
- Nair, P. B. & Abraham, R. G. 2010, *ApJS*, 186, 427
- Parry, O. H., Eke, V. R., & Frenk, C. S. 2009, *MNRAS*, 396, 1972
- Paturel, G., Fouque, P., Bottinelli, L., & Gouguenheim, L. 1995, *VizieR Online Data Catalog*, 7119, 0
- Peletier, R. F. & Balcells, M. 1996, *AJ*, 111, 2238
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H. 2002, *AJ*, 124, 266
- Pérez, I. & Sánchez-Blázquez, P. 2011, *A&A*, 529, A64+
- Petrosian, V. 1976, *ApJ*, 209, L1
- Sandage, A. & Binggeli, B. 1984, *AJ*, 89, 919
- Sandage, A. & Tammann, G. A. 1981, *A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies* (Washington: Carnegie Institution, 1981, Preliminary version)
- Scannapieco, C., Gadotti, D. A., Jonsson, P., & White, S. D. M. 2010, *MNRAS*, 407, L41
- Schechter, P. 1976, *ApJ*, 203, 297
- Schombert, J. M., Pildis, R. A., Eder, J. A., & Oemler, Jr., A. 1995, *AJ*, 110, 2067
- Sheth, K., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., et al. 2008, *ApJ*, 675, 1141
- Simard, L. 1998, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 145, *Astronomical Data Analysis Software and Systems VII*, ed. R. Albrecht, R. N. Hook, & H. A. Bushouse, 108–+
- Simard, L., Willmer, C. N. A., Vogt, N. P., et al. 2002, *ApJS*, 142, 1
- Slosar, A., Land, K., Bamford, S., et al. 2009, *MNRAS*, 392, 1225
- Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., et al. 2001, *AJ*, 122, 1861
- van den Bergh, S. 1998, *Galaxy Morphology and Classification*, ed. van den Bergh, S.
- van den Bergh, S. 2007, *AJ*, 134, 1508
- van den Bergh, S. 2008, *A&A*, 490, 97
- Yamauchi, C., Ichikawa, S., Doi, M., et al. 2005, *AJ*, 130, 1545

Quatrième partie

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le relevé ESO-Sculpteur

Je décris dans une première partie les divers résultats publiés concernant le relevé ESO-Sculpteur. Celui-ci a produit un catalogue photométrique (Arnouts et al. 1997) et un suivi spectroscopique (Bellanger et al. 1995) dans un pinceau étroit de l'Univers à $z \lesssim 0.6$. Ces données ont fourni la première cartographie des grandes structures à $z \simeq 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995), montrant la même alternance de vides et feuillets qu'à faible décalage spectral. Par le soin apporté à la calibration en flux des spectres et aux mesures des décalages vers le rouge, nous avons obtenu une classification spectrale dont les corrections-K et magnitudes absolues résultantes permettent une séparation des différents groupes de galaxies géantes et naines. Nous avons ainsi mis en évidence les composantes géantes et naines des fonctions de luminosité des galaxies à $z \sim 0.5$, connues uniquement dans le groupe local (de Lapparent et al. 2003; de Lapparent 2003).

La connaissance détaillée des fonctions de luminosité a permis des analyses fines des distributions en magnitude et décalage spectral, ainsi que du regroupement spatial des galaxies. D'une part, nous avons pu montrer que l'excès de galaxies dans les comptages profonds est causée principalement par une évolution marquée des galaxies spirales tardives et Irrégulières (de Lapparent et al. 2004). Nous avons de surcroît effectué la première mesure des composantes géantes et naines dans la fonction de corrélation des galaxies à $z \sim 0.5$, et obtenu des indications sur la répartition relative des différents types de galaxies au sein des halos de matière noire (de Lapparent & Slezak 2007). Enfin, un suivi dans infrarouge moyen à $12\mu\text{m}$ produit l'excès habituel dans les comptages normalisés, que nous modélisons au moyen des populations de galaxies normales du modèle PEGASE.3 (Fioc et al. 2011) et d'une petite population supplémentaire de galaxies massives ultra-lumineuses dans l'infrarouge et évoluant selon un scénario de galaxies elliptiques (Seymour et al. 2007; Rocca-Volmerange et al. 2007).

Dans ce mémoire, je propose des analyses statistiques complémentaires du relevé ESO-Sculpteur. D'abord, j'évalue le niveau de significativité de la sur-densité marquée située dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$, soit 170 Mpc en distance comobile, et présentant un contraste de densité de 2.1. Pour cela j'utilise la fonction de corrélation le long de la ligne-de-visée et en séparation projetée. J'obtiens 2.6σ ou 3.3σ si je considère ou non cette structure inhabituelle dans le calcul de la fonction de corrélation, cette structure causant un excès de signal aux échelles entre 3 et 10 Mpc qui n'est pas observé dans les mesures effectuées à partir de relevés plus volumineux.

Je propose en outre une autre estimation de la fréquence d'occurrence de telles structures en utilisant les simulations du "Millennium". Pour cela j'extrait 363 pinceaux étroits de même géométrie que le relevé ESO-Sculpteur, et dans lesquels je recherche des fluctuations de densité avec les mêmes caractéristiques que la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$. La probabilité est faible, de 1 à 3% selon la référence utilisée, indiquant que de telles structures sont rares. Si la sur-densité détectée dans le relevé ESO-Sculpteur s'étendait angulairement sur 2×2 degré-carrés avec le même contraste de densité de ~ 2.1 , elle atteindrait un niveau de significativité de 4 à 5 σ , et serait plus difficile à réconcilier avec les résultats des simulations numériques.

Par comparaison avec les types spectro-photométriques obtenus par l'ajustement des scénarios évolutifs PEGASE, nous montrons des différences systématiques avec la classification spectrale, cette dernière étant resserrée autour du type central Sbc. Nous montrons que ces différences ont un lien avec l'orientation relative des fentes par rapport à l'orientation du grand axe des objets en projection sur le ciel @. Je montre par ailleurs que des très grandes fluctuations telles que la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ peuvent être détectées au moyen des décalages vers le rouge photométriques lorsque la précision de la photométrie optique est au plus de 0.01 mag., ou 0.05 mag. si l'on dispose de surcroît de la photométrie infrarouge proche. En revanche, une mesure précise à 1% des décalages photométriques dans l'intervalle $0 < z < 0.7$ nécessite la photométrie optique et infrarouge, avec une dispersion maximale de ~ 0.01 mag..

Ces analyses à partir des simulations du Millennium et des mesures de décalages vers le rouge photométriques posent des limites intéressantes sur la capacité des futurs relevés tels que le "Dark Energy Survey" et le "Large Synoptic Survey", ainsi que le projet "EUCLID", à détecter des structures atypiques dans la distribution spatiale des galaxies.

Le catalogue EFIGI

Dans la deuxième partie du mémoire, je présente le relevé morphologique EFIGI. Celui-ci a produit un catalogue de galaxies proches avec images bien résolues dans les bandes *ugriz* du relevé SDSS, et couvrant 6670 deg^2 du ciel. La morphologie visuelle se présente sous la forme de 16 attributs de forme, et du type de Hubble. Ces attributs fournissent pour la première fois de une description quantitative de la séquence de Hubble en terme de rapport bulbe-sur-total et d'enroulement des bras spiraux. La fréquence des barres et anneaux est mesurée pour tous les types morphologiques. On confirme que les galaxies de types spirals Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd sont de grands systèmes et que les naines de ce type sont rares ; seul deux objets sont trouvés dans le catalogue. En revanche, les galaxies de type Sd, Sdm, Sm sont systématiquement plus petites que les spirales Sa à Scd, avec une décroissance progressive le long de la séquence, et les galaxies cE, Im et dE sont bien des galaxies naines.

Dans un deuxième temps, j'ai utilisé le catalogue EFIGI pour tester les nouveaux ajustements multi-profil insérés par E. Bertin dans SExtractor. Une somme d'un bulbe avec profil "de Vaucouleurs" et d'une disque exponentiel fournit des mesures en très bon accord avec les magnitudes d'ouverture, et présente l'avantage de récupérer la fraction du flux manquant qui varie systématiquement avec le type morphologique. L'ajustement des modèles permet aussi de s'affranchir des problèmes de contamination qui affectent les magnitudes d'ouverture.

Ces nouvelles mesures des magnitudes des galaxies de l'échantillon EFIGI me permet de montrer que l'analyse effectuée par la chaîne de traitement du SDSS morcelle 9% des galaxies d'EFIGI en différentes unités, ce qui crée un déficit de flux dans les mesures, qui peut atteindre 10 magnitudes. En outre, l'ensemble des galaxies d'EFIGI (à $g \simeq 9 - 14$) présentent un déficit systématique de flux de 2 à 0.5 mag. (des plus brillantes vers les plus faibles), à cause d'une sur-estimation croissante du fond de ciel pour les objets étendus. De nombreuses sources des catalogues photométriques du SDSS sont en outre des artefacts, et cela ramène la complétude photométrique du catalogue EFIGI à plus de 80% aux magnitudes brillantes dans les 5 filtres. La comparaison des magnitudes "MODEL" de SExtractor

Ces mesures fiables des magnitudes des galaxies d'EFIGI me permet de revisiter la relation couleur-magnitude des galaxies. Je confirme qu'il n'y a pas de bi-modalité dans ce plan, mais un glissement progressif selon les types morphologiques. Les erreurs de photométrie des catalogue du SDSS contribuent en outre à rétrécir les intervalles de couleur et de magnitudes pour les galaxies de différents types morphologiques. Ainsi, les pics ou vallées de densité éventuellement détectés dans d'autres analyses dépendent des effets de sélection sur les types morphologiques de l'échantillon considéré.

Je montre ensuite que les types spectro-photométriques obtenus par l'ajustement des scénario de PÉGASE.2 (via ZPEG) montre une dispersion importante en comparaison avec les types morphologiques. L'effet principal est le rougissement des distributions en énergie spectrale causée par l'inclinaison des galaxies, qui cause une dispersion des types spectro-photométriques sur plusieurs types morphologiques, ainsi qu'un décalage systématique vers les types spectro-photométriques plus précoces pour les galaxies spirales de morphologie Sa jusqu'à Scd.

J'examine ensuite les fonctions de luminosité de l'échantillon EFIGI. La fonction globale est bien ajustée par une loi de Schechter. Le catalogue EFIGI permet pour la première fois à partir d'une photométrie de qualité et pour de grands échantillons statistiques de calculer les fonctions de luminosité par type morphologique. Je retrouve les fonctions bornées pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales géantes, et les fonctions croissantes aux faibles magnitudes pour les spirales tardives, pour les irrégulières et les naines elliptiques. L'utilisation de la photométrie des catalogues du SDSS introduit des biais causant un déficit d'objets aux magnitude brillantes et faibles pour tous les types. J'utilise le catalogue EFIGI pour illustrer le mélange dramatique des types morphologiques lorsqu'on utilise une séparation en couleur ou en type spectro-photométrique.

Enfin, je présente des résultats préliminaires concernant les couleurs des bulbes et des disques ajustés par SExtractor sur les galaxies du catalogue EFIGI. Les couleurs des disques des spirales exhibent un bleuissement progressif le long de la séquence de Hubble, alors que les bulbes sont aussi rouges ou plus rouges que ceux des elliptiques, suggérant un rougissement par les poussières, principalement pour les spirales de types Sa, Sab, Sb et Sbc.

Perspectives

Les différences systématiques mises en évidence entre les types spectraux, les types spectro-photométriques, et les types morphologiques illustrent la difficulté à déterminer de façon cohérente le type d'une galaxie proche ou lointaine. Parce la morphométrie est étroitement liée à d'autres descripteurs majeurs des galaxies (flux, contenu stellaire, masse), elle apparaît comme une approche performante pour effectuer une séparation univoque des différents types physiques de galaxies. La morphométrie permet en outre la mesure des fonctions de luminosité intrinsèques, qui sont non seulement utiles pour contraindre les mécanismes de formation des galaxies au sein des halos de matière noire, mais constituent aussi des outils indispensables pour déterminer les effets de sélection dans les relevés observationnels, systématiquement limités en flux. Ainsi, les fonctions de luminosité sont l'outil de base pour prédire les distributions de comptages, et ont des répercussions majeures sur l'évolution des galaxies lorsque l'on considère par exemple l'infrarouge moyen. Un complément important dans le calcul des fonctions de luminosité sera la prise en compte des limitations en brillance de surface (voir Cross & Driver 2002).

Les effets systématiques dans la photométrie des galaxies brillantes du relevé SDSS, que nous avons mis en évidence, montrent le fait que la performance des logiciels de mesure dépend de l'objectif scientifique qui est fixé, et peuvent affecter de façon importante la photométrie des galaxies proches. Ayant montré que le relevé SDSS ne permet pas un recensement complet et photométriquement fiable de l'Univers proche, une réanalyse de l'ensemble du relevé SDSS est nécessaire jusqu'à au moins $g \sim 17$. Ce projet sera démarré en 2011 à l'IAP, avec pour objectif de fournir à la communauté astronomique une photométrie précise pour les galaxies de l'Univers proche, ainsi que la mesure de leurs paramètres morphométriques.

La qualité des images du relevé SDSS, et la grande couverture angulaire offre l'opportunité unique d'élaborer un catalogue complet à $z \simeq 0.1$, qu'il serait dommage de ne pas explorer. Cela requiert des capacités de stockage et de calcul important, que notre équipe a pu acquérir et installer à l'IAP. L'idéal serait de mettre en place un service web qui fournira les images fits et les paramètres morphométriques de toutes les galaxies jusqu'à $g \simeq 17$, soit $\sim 100,000$ galaxies. Ce catalogue représentera un échantillon statistique sans précédent, de par le nombre d'objets, la qualité photométrique, et l'éventail complet des différents types et particularités morphologiques. L'analyse qui sera effectuée permettra en outre de tester la photométrie des catalogues de galaxies fournis par le projet SDSS aux magnitudes $g > 17$, dans un domaine de flux où la photométrie ne devrait pas être affectée par les erreurs systématiques présentées ici.

Les fonctions de luminosité et de corrélation, permettant de caractériser les différentes populations de galaxies et leur regroupement à grande échelle, pourront alors être mesurées avec une excellente statistique en fonction des nombreuses caractéristiques morphologiques identifiées. On pourra aussi revisiter la controverse sur les relations et distinctions entre les galaxies elliptiques et les galaxies naines elliptiques, ainsi qu'entre les galaxies elliptiques géantes et aux cœurs défectueux en lumière, et les elliptiques plus petites, en rotation, présentant un excès central de lumière (Graham 2005; Kormendy et al. 2009; Kormendy 2009). L'existence de traces morphométriques résultants de la distinction dynamique entre les galaxies elliptiques et lenticulaires (Cappellari et al. 2011) pourra aussi être examinée.

Ce recensement complet des galaxies de l'Univers proche donnera en outre la possibilité de comparer les propriétés spectrales avec les propriétés morphologiques des galaxies SDSS, et de mieux contraindre les spectres de références auxquels les divers modèles de synthèse spectrale sont confrontés. Cela devrait conduire à une amélioration de la performance des techniques de classification spectro-photométrique et de mesure des décalages vers le rouge photométriques. Une étape déterminante sera l'ajout dans les modèles des scénarios manquants parmi les types morphologiques mis en évidence par EFIGI galaxies, comme par exemple les galaxies naines elliptiques. La définition d'un nouveau scénario nécessite des mesures statistiques en quantité et qualité suffisantes au temps présent pour modéliser les divers diagrammes couleur-couleur. Une meilleure compréhension de l'ajustement des spectres de référence pour la mesure des décalages vers le rouge photométriques est importante pour les mesures d'oscillations baryoniques acoustiques (Eisenstein et al. 2005), ainsi que pour celles du cisaillement gravitationnel, la distribution des sources en décalage spectral ayant un impact déterminant sur les résultats (Fu et al. 2008).

Les ajustements de modèles bi-dimensionnels de bulbe + disque effectués sur les galaxies du catalogue EFIGI au moyen de SExtractor (Bertin et al. 2011) donnent des résultats prometteurs sur les mesures statistiques des propriétés des bulbes et des disques. Les mesures de fonctions de luminosité pour les

composantes de bulbe et de disque des galaxies seront intéressantes pour une comparaison avec les simulations à N-corps (voir par exemple Baugh et al. 1996; Kauffmann et al. 1997; Cole et al. 2000). La modélisation des profils devrait servir à évaluer les biais d'inclinaison sur la photométrie des galaxies, pour une prise en compte dans les analyses des catalogues de galaxies distantes. Ce travail devra se baser sur les mesures de profil des composantes de bulbe et de disque effectuées sur les galaxies bien résolues du catalogue EFIGI, puis sur l'ensemble du relevé SDSS, afin d'échantillonner les populations de galaxies dans des conditions réalistes.

On pourra par ailleurs montrer quel est l'effet des biais d'ouverture et des erreurs sur la calibration en flux des spectres obtenus par fibre optique, qui affectent peut-être la spectroscopie des galaxies les plus distantes du relevé SDSS. Celle-ci a été largement utilisée pour déduire des contraintes sur l'évolution des galaxies et montrer l'effet de "down-sizing". On peut imaginer des effets liés aux composantes de bulbe et disque des différents types morphologiques.

Les attributs morphologiques visuels du catalogue EFIGI, et les résultats conjoints des simulations numériques de formation des galaxies nous aiguillent sur les développements critiques à introduire dans les ajustements de profil. Des composantes de barre et d'anneau, et une bande de poussière pour les galaxies inclinées, peuvent par exemple être ajoutées. Mais les dégénérescences doivent être testées au moyen d'images simulées si l'on souhaite une application "automatique" à de grands échantillons.

Les images résiduelles de l'ajustement bulbe + disque de SExtractor peuvent aussi être utilisées pour étudier les autres composantes des galaxies. D'une part, une méthode de détermination automatique et quantitative de la flocculence des galaxies a été effectuée sur les galaxies du catalogue EFIGI (Dumoncel et al. 2008). Au cours de sa thèse, A. Baillard a par ailleurs testé l'ajustement linéaire d'anneaux multipolaires sur ces résidus, dans le but de modéliser les bras spiraux, les anneaux et les barres. Ces ajustements permettent d'obtenir une réduction dimensionnelle des images de galaxies avec une centaine de coefficients, et ceci indépendamment de la variation de qualité d'image (Baillard 2008). Des résultats préliminaires sur l'application d'un système d'apprentissage aux coefficients de projection sur la base d'anneaux ont été obtenus, permettant d'évaluer automatiquement et quantitativement la présence d'attributs comme les barres, les anneaux, la poussière ou la flocculence avec des taux de succès allant de 69 à 92 %. Cette approche permet aussi de mesurer le sens de rotation des bras avec un taux de succès comparable à celui des détermination visuelles pour le catalogue EFIGI (47% par apprentissage versus 55% par les astronomes). Ces résultats sont prometteurs et devront être re-explorés au moyen du catalogue EFIGI, les attributs visuels et des images bien résolues étant indispensables à ce travail.

Les outils performants d'*AstrOmatic* (<http://www.astromatic.net>) qui sont développés à l'IAP par Emmanuel Bertin et concernent la modélisation automatique de la réponse impulsionnelle et ses variations spatiales sur les images seront cruciaux pour étudier l'évolution de la morphométrie avec le décalage spectral. Des champs DEEP et WIDE du relevé CFHTLS sont en cours d'analyse morphométrique, et, par de nombreux tests, ont contribué aux améliorations apportés récemment à SExtractor. L'analyse de ces images profondes nécessitera un contrôle des mesures par simulation d'images au moyen d'un autre outil d'*AstrOmatic*, SkyMaker, afin d'évaluer quantitativement les biais et limites des algorithmes automatiques, et l'impact sur la séparation des différentes populations de galaxies. La connaissance de la morphométrie des galaxies bien résolues du catalogue EFIGI, et de l'ensemble du relevé SDSS sera en parallèle indispensable.

Les champs WIDE et DEEP du relevé "Legacy" du TCFH permettront d'explorer en détail et avec une bonne statistique les liens entre le contenu spectral, la luminosité, la masse, et la morphologie. L'intérêt de la connaissance des types morphologiques est de lever les dégénérescences spectrales, et d'obtenir une meilleure détermination des fonctions de masse par type de galaxie. Un des objectifs est de retracer l'histoire de l'accumulation de la masse dans les galaxies, en déterminant le rôle des fusions ainsi que la nature des objets dans lesquels ces fusions jouent un rôle déterminant, caractérisé notamment par des épisodes de formation d'étoiles. Un indicateur de fusions majeures pour une catégorie de galaxies serait une variation systématique du rayon d'échelle. Le défi réside dans la difficulté à isoler et suivre un même type de galaxies au cours du temps. L'analyse des comptages infrarouge-moyen montre l'étendue de la marge de modélisation, posant le dilemme récurrent entre l'évolution en nombre et l'évolution en luminosité. L'analyse des relevés optiques et infrarouge-proche des champs du CFHTLS devraient fournir des résultats discriminants.

Nous estimons pouvoir détecter et quantifier les composantes de bulbe et de disque des galaxies jusqu'à $z \sim 1$. Par les ajustements de profils, on pourra examiner comment se comportent à grand décalage spectral les relations entre la brillance de surface effective et le rayon effectif pour les bulbes (Kormendy 1977), ainsi que celle entre la brillance de surface centrale et le rayon d'échelle pour les disques (de Jong 1996; Graham et al. 2001). Il sera intéressant de reconsidérer la séquence de Hubble en terme d'histoire des bulbes et des disques. On pourra aussi examiner le rôle des barres, des anneaux, de la flocculence, et de la poussière, aux plus faibles décalages vers le rouge auxquels ces composantes seront détectées.

Les données du relevé SDSS serviront de référence à faible décalage spectral pour ces analyses à $0.5 \lesssim z \lesssim 1$. Par la mesure du regroupement spatial des galaxies, on pourra poser des contraintes sur les fonctions de distribution des différents types au sein des halos de matière noire. L'évolution avec le décalage vers le rouge permettra de confronter ces fonctions à l'histoire théorique de l'assemblage des halos. On pourra ainsi examiner directement l'évolution du lien entre la nature des galaxies et leur environnement. Nous estimons que cette connaissance détaillée des propriétés des galaxies proches et lointaines, en comparaison avec les simulations numériques à venir, qui allieront résolution et grand volume, marquera des avancées substantielles.

Références

- Arnouts, S., de Lapparent, V., Mathez, G., et al. 1997, *A&AS*, 124, 163
- Baillard, A. 2008, Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies (Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications)
- Baugh, C. M., Cole, S., & Frenk, C. S. 1996, *MNRAS*, 283, 1361
- Bellanger, C. & de Lapparent, V. 1995, *ApJ*, 455, L103
- Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., et al. 1995, *A&AS*, 110, 159
- Bertin, E., Delorme, P., Baillard, A., Marmo, C., & Semah, G. 2011, in preparation
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnovic, D., et al. 2011, ArXiv e-prints
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Cross, N. & Driver, S. P. 2002, *MNRAS*, 329, 579
- de Jong, R. S. 1996, *A&A*, 313, 45
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., & Bardelli, S. 2004, *A&A*, 422, 841
- de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., & Arnouts, S. 2003, *A&A*, 404, 831
- de Lapparent, V. & Slezak, E. 2007, *A&A*, 472, 29
- Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., et al. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 394, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, ed. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, & J. R. Lewis, 497
- Eisenstein, D. J., Blanton, M., Zehavi, I., et al. 2005, *ApJ*, 619, 178
- Fioc, M., Rocca-Volmerange, B., & Dwek, E. 2011
- Fu, L., Semboloni, E., Hoekstra, H., et al. 2008, *A&A*, 479, 9
- Graham, A. W. 2005, in *IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies*, ed. H. Jerjen & B. Binggeli, 303–310
- Graham, A. W., Trujillo, I., & Caon, N. 2001, *AJ*, 122, 1707
- Kauffmann, G., Nusser, A., & Steinmetz, M. 1997, *MNRAS*, 286, 795
- Kormendy, J. 1977, *ApJ*, 218, 333
- Kormendy, J. 2009, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 419, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, ed. S. Jogee, I. Marinova, L. Hao, & G. A. Blanc, 87–+
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. 2009, *ApJS*, 182, 216
- Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., & Fioc, M. 2007, *A&A*, 475, 801
- Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., & de Lapparent, V. 2007, *A&A*, 475, 791

Cinquième partie

EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE ET PUBLICATIONS

Curriculum Vitae

Née le 19 novembre 1962
2 fils, nés en 1991 et 1994
divorcée

Diplômes :

1979	Baccalauréat C, Académie de Versailles
1982	Licence de Physique, Université Paris 6
1982	Maîtrise de Physique, Université Paris 6
1983	D.E.A. d'Astronomie et Techniques Spatiales, Université Paris 7
1986	Doctorat d'Astrophysique, Université Paris 7

Scolarité :

1979–1981	Mathématiques Supérieures, Lycée Louis-le-Grand, Paris
1980–1981	Mathématiques Spéciales P', Lycée Louis-le-Grand, Paris
1981–1985	Ecole Normale Supérieure, Sèvres
1983–1985	Echange ENS-Harvard University, Center for Astrophysics, USA
1985–1986	CfA Pre-Doctoral Fellow, Center for Astrophysics, USA

Emplois :

1985	Assistante, Harvard University
1986–1988	CfA Post-doctoral Fellow, Center for Astrophysics
1988–1992	Chargée de Recherche 2 ^{ème} classe du CNRS, Institut d'Astrophysique de Paris
1992–	Chargée de Recherche 1 ^{ère} classe du CNRS, Institut d'Astrophysique de Paris

Divers :

1984–1986	Bourse Amelia Earhart, Zonta International
1989	Médaille de Bronze du CNRS

Chapitre 1

Expérience professionnelle

1.1 Encadrement

1.1.1 Stagiaires

J'ai dirigé trois stages de DEA et de Maîtrise, effectués à l'IAP par :

- Jean-Philippe Boulanger en 1990 (DEA) ;
- Christèle Bellanger en 1991 (DEA) ; actuellement dans l'enseignement privé ;
- Benoît Revenu en 1992 (Maîtrise) ; actuellement chargé de recherche au CNRS (Section 03) à SUBATECH-Nantes

1.1.2 Doctorants

J'ai dirigé et co-dirigé les quatre thèses de doctorat, effectuées à l'IAP par :

- Christèle Bellanger, diplôme obtenu en septembre 1995 ; actuellement dans l'enseignement privé ;
- Stéphane Arnouts, diplôme obtenu en septembre 1996 ; actuellement chargé de recherche au CNRS (Section 17) dans le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille ;
- Gaspar Galaz, diplôme obtenu en septembre 1997 ; actuellement professeur assistant à l'Université Catholique du Chili, Santiago.
- Anthony Baillard, diplôme obtenu en décembre 2008 ; thèse dirigée en co-tutelle par A. Bijaoui (Obs. Nice-Côte d'Azur) et E. Bertin (IAP) ; actuellement dans le privé

1.1.3 Post-Doctorants

J'ai supervisé et supervise les séjours post-doctoraux à l'IAP de :

- Rémi Cabanac (1998-2000), actuellement directeur du Télescope Bernard Lyot ;
- Nick Seymour (2002-2004) ; actuellement au Mullard Space Science Laboratory, Univ. College London (Royaume-Uni) ;
- Yuko Kakazu (2007-2009) ; actuellement post-doctorante à Caltech (Etats-Unis).

1.2 Responsabilités scientifiques

En 1989, un an après mon recrutement au CNRS, j'ai initié, coordonné et mené à terme un programme-clé de l'ESO.

Je fus activement impliquée dans le conseil scientifique du GdR “Cosmologie”, qui allait conduire à la création du Programme National de Cosmologie (PNC) en 1996 (puis au PNCG).

J’ai aussi fait partie du groupe scientifique qui a porté le projet MEGACAM/CFHTLS depuis ses débuts (projet “LITE” : Vigroux, de Lapparent, Mellier *et al.* 1993) jusqu’au financement de la caméra, sa construction, et la définition des relevés “Legacy”.

En mars 2005, j’ai pris l’initiative et la responsabilité du groupe de recherche “Origine et Evolution des Galaxie” à l’IAP, auquel sont rattachés 13 chercheurs permanents, et en moyenne 10 doctorants et post-doctorants (voir pages du groupe : http://www2.iap.fr/users/lapparent/formation_evolution_galaxies.shtml),

Récapitulatif de l’ensemble des responsabilités scientifiques :

- Membre du conseil scientifique du GdR Cosmologie de 1991 à 1996 ;
- Membre du comité d’attribution du temps de télescope à l’ESO de 1995 à 1996 ;
- Membre du comité d’élaboration du projet MEGACAM/CFHTLS de 1992 à 2000 ;
- Responsable du groupe de recherche “Origine et Evolution des Galaxies” depuis 2005 ;
- Présidente du conseil scientifique de l’OSU IAP depuis mars 2007.

1.3 Animation de la recherche

Dans le cadre du groupe de recherche “Origine et Evolution des Galaxies” à l’IAP (recherche “google : journal-club galaxies”), j’anime un journal-club hebdomadaire qui inclut :

- des présentations de travaux effectuées par les membres du groupe, par leurs visiteurs étrangers, et par d’autres collègues de l’IAP et de laboratoires nationaux
- des séances de discussion critique d’articles récemment mis en pré-publication
- des discussions de prospective scientifique, orientée en partie vers l’interprétation des grands relevés multi-longueur d’onde.

1.4 Responsabilités administratives

Je fus membre nommée (de 1992 à 1995), puis élue (de 2001 à 2005) du conseil de laboratoire de l’IAP.

Je suis responsable depuis 1998 de l’accueil des visiteurs et nouveaux arrivants à l’IAP (doctorants, post-doctorants, visiteurs et stagiaires ; 250 personnes par an). Le système mis en place fournit le cadre logistique indispensable au bon fonctionnement des nombreuses collaborations internationales des chercheurs de l’IAP.

1.5 Diffusion de la connaissance scientifique

Je participe depuis mon entrée au CNRS à des activités de diffusion de l’astrophysique auprès de publics divers :

- conférences en milieu universitaire et scolaire (primaire, secondaire, classes préparatoires),
- conférences grand public (dont AMA09 et journées du patrimoine),
- accueil de classes (primaire et secondaire) à l’IAP pendant la “ Science en Fête”,
- rédaction d’articles de vulgarisation,
- relecture d’articles écrits par des journalistes scientifiques,

dont notamment :

- conception et développement d’un site web de diffusion (<http://www.harmoniacelestis.net>),
- interventions dans des films de vulgarisation scientifique (on peut visionner un reportage récent sur les images du relevé CFHTLS sur ma page personnelle <http://www2.iap.fr/users/lapparent>)
- participation à l’exposition et au livre “1000 chercheurs parlent d’avenir” par Pierre Maraval

1.5.1 Conférences grand public

Mars 2011	Centre de conférence Atria, Belfort “La tapisserie cosmique: galaxies et grandes structures” <i>Printemps des Planétariums</i>
Septembre 2010	Observatoire Camille Flammarion, Juvisy “Galaxies et grandes structures de l’Univers” <i>Journées du Patrimoine</i>
Décembre 2009	Institut de Physique, Université de Strasbourg “Galaxies, grandes structures, et vides cosmiques” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société Française de Physique, Section Alsace</i>
Septembre 2009	Institut d’Astrophysique de Paris “Vides cosmiques et murailles intergalactiques dans l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles, Institut d’Astrophysique de Paris</i>
Mai 2009	Université de Caen “Tapisserie cosmique: galaxies, vides et murs” <i>Grande conférence “Année Mondiale de l’Astronomie 2009”</i>
Avril 2009	Collège Georges Sand, Châtellerauld “Galaxies et Grandes Structures dans l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société des Sciences de Châtellerauld</i>
Décembre 2008	Salle Bretagne, Nantes “Les grandes structures de l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société Astronomique de Nantes</i>
Novembre 2008	Grand Palais, Paris “Les grandes structures de galaxies dans l’Univers” <i>Exposition “Paris Ville Européenne des Sciences”</i>
Octobre 2007	FIAP, Paris 13 ^e “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides Cosmiques, et Murailles Intergalactiques” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société d’Astronomie Française</i>
Mars 1998	Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications “La Structure à Grande Echelle de l’Univers ” <i>Cycle de conférences mensuelles, Club d’Information Scientifique des PTT</i>
Mai 1997	Uranoscope de Gretz-Armainvilliers “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides et Murs” <i>Conférence</i>
Octobre 1996	Institut d’Astrophysique de Paris “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides et Murs” <i>“La Science en Fête”</i>

Juin 1996	Ecole des Mines de Paris “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides et Murs” <i>Conférence</i>
Novembre 1995	Institut d’Astrophysique de Paris “Une Tapisserie Cosmique : Les Grandes Structures de l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles</i>
Juin 1993	Ecole Polytechnique, Palaiseau “Cartographier la Distribution des Galaxies” <i>Conférence</i>
Juin 1992	Ecole Polytechnique, Palaiseau “Observation de la Distribution des Galaxies” <i>Conférence</i>
Mars 1992	Saint-Genis Laval “Cartographier l’Univers à Grande Echelle ” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société Astronomique de Lyon</i>
Février 1991	Institut Océanographique “Les Structures de l’Univers à Grande Echelle” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société d’Astronomie Française</i>
Novembre 1990	Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris “Les Structures de l’Univers à Grande Echelle” <i>Journées “Actualités en Astronomie”, AFAS/SAF</i>
Février 1990	Université Paris VII “La Distribution des Galaxies” <i>Association Femmes et Mathématiques</i>
Décembre 1986	Center for Astrophysics, Cambridge “Cosmic Bubbles” <i>Amateur Telescope Makers Monthly Meeting</i>
Octobre 1986	Center for Astrophysics, Cambridge “Bubbles in the Universe: Nature’s Largest Structures?” <i>Monthly Popular Observatory Night</i>
Octobre 1985	Holiday Inn, Woburn “Bubbles and Voids in the Galaxy Distribution” <i>Zonta International Award Ceremony</i>

1.5.2 Conférences d’éveil et de formation

Octobre 2010	Institut d’Astrophysique de Paris “Observer les galaxies dans l’Univers, et appréhender l’échelle des distances” <i>Accueil de 2 classes de CM2 pour “La Science en Fête”</i>
--------------	---

Mai 2010	Lycée Jean Rostand de Caen “Les grandes structures de l’Univers” <i>Journée de formation en Astronomie pour professeurs de Mathématiques, Physique et Sciences et Vie de la Terre (CLEA)</i>
Décembre 2009	Lycée Malherbe de Caen “Cartographier l’Univers : distances, galaxies et grandes structures” <i>Présentation pour classes préparatoires (2 classes de MPSI)</i>
Octobre 2009	Lycée André Maurois de Deauville “Les galaxies dans l’Univers : distances et grandes structures” <i>Présentation pour lycéens (2 classes de 2^{nde})</i>
Avril 2009	Institut d’Astrophysique de Paris “Du système solaire aux galaxies : échelle des distances dans l’Univers” <i>Accueil d’une classe de Terminale S du Lycée Saint Nicolas, Paris 15^e</i>
Novembre 2008	Institut d’Astrophysique de Paris “Observer les galaxies dans l’Univers, et appréhender l’échelle des distances” <i>Accueil de 2 classes de CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2007	Institut d’Astrophysique de Paris “Du système solaire aux galaxies : échelle des distances dans l’Univers” <i>Accueil de 4 classes de CE1, CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2007	Lycée Technique “Ecole Nationale de Chimie”, Paris 13 ^e “La structuration de l’Univers à Grande Echelle” <i>Présentation à 2 classes de 2^{nde} pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2006	Institut d’Astrophysique de Paris “Combien l’Univers est grand : échelle des distances et galaxies” <i>Accueil de 3 classes de CE1, CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2005	Ecole primaire, classe de CM, Paris 13 ^e “Combien l’Univers est grand : échelle des distances et galaxies” <i>Intervention pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2004	Institut d’Astrophysique de Paris “Combien l’Univers est grand : échelle des distances et galaxies” <i>Accueil de 2 classes de CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Avril 2004	Institut d’Astrophysique de Paris “Les outils de l’astronomie moderne pour cartographier la distribution des galaxies dans l’Univers” <i>Cours d’Astronomie Moderne pour étudiants de “Sciences Politiques”</i>
Février 1990	Universités Paris VII et Paris XI, Meudon “Les Grandes Structures de Galaxies” <i>Conférence au DEA d’Astronomie et Techniques Spatiales</i>
Janvier 1989	Universités Paris VII et Paris XI, Meudon “Observations des Grandes Structures de l’Univers Proche. Perspectives Futures” <i>Conférence au DEA d’Astronomie et Techniques Spatiales</i>

Novembre 1986 Center for Astrophysics, Cambridge
 “Bubbles and Voids”
 Cours d’Astronomie Moderne pour étudiants en journalisme scientifique

Chapitre 2

Publications

Articles acceptés :

- 2011 “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”
Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R.,
Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A.,
Tasca, L., A&A, sous presse, astro-ph/1103.5734
- 2011 “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology. II. Statistical properties
along the Hubble sequence”
de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E., A&A, sous presse, astro-ph/1103.5735

Articles parus dans revue avec comité de lecture :

- 2007 “The 12 μm ISO-ESO-Sculptor and 24 μm Spitzer faint counts reveal a population of ULIRG
as dusty massive ellipticals. Evolution by types and cosmic star formation”
Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent, V.**, Seymour, N., Fioc, M., A&A 475, pp. 801–812
- 2007 “A 12 μm *ISOCAM* survey of the ESO-Sculptor field II. Data Reduction and Analysis”
Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent, V.**, A&A 475, pp. 791–799
- 2007 “Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy
type at redshifts 0.1–0.5”
de Lapparent, V., Slezak, E., A&A 472, pp. 29–49
- 2007 “The Large Zenith Telescope - A 6-meter Liquid-Mirror Telescope”
Hickson, P., Pfrommer, T., Cabanac, R., Crottes, A., Johnson, B., **de Lapparent, V.**,
Lanzetta, K., Gromoll, S., Mulrooney, M., Sivanandam, S., Truax, B., PASP 119, pp. 444–
455
- 2004 “The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1–0.5”
de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S., A&A 422, pp. 841–863
- 2003 “Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift sur-
veys”
de Lapparent, V., A&A 408, pp. 845–872
- 2003 “The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts
0.1–0.5”
de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S., A&A 404, pp. 831–860

- 2002 “Classification and redshift estimation by principal component analysis”
Cabanac, R. A., **de Lapparent, V.**, Hickson, P., A&A 389, pp. 1090–1116
- 2000 “Evolution of faint galaxy clustering. The 2-point angular correlation function of 20,000 galaxies to $V < 23.5$ and $I < 22.5$ ”
Cabanac, R. A., **de Lapparent, V.**, Hickson, P., A&A 364, pp. 349–368
- 1998 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: Spectral Classification at $z \leq 0.5$ ”
Galaz, G., **de Lapparent, V.**, A&A 332, pp. 459–478
- 1997 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: The Photometric Sample”
Arnouts, S., **de Lapparent, V.**, Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., Bertin, E., & Kruszewski, A., A&A Suppl 124, pp. 1–21
- 1995 “Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”
Bellanger, C., **de Lapparent, V.**, Ap. J. Lett. 455, pp. L103–L107
- 1995 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: The Spectroscopic Sample”
Bellanger, C., **de Lapparent, V.**, Arnouts, S., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., A&A Suppl 110, pp. 159–171
- 1993 “Objective Detection of Voids and High-Density Structures in the First CfA Redshift Survey Slice”
Slezak, E., **de Lapparent, V.**, & Bijaoui, A., Ap. J. 409, pp. 517–529
- 1991 “Measures of Large-Scale Structure in the CfA Redshift Survey Slices”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., Ap. J. 369, pp. 273–286
- 1990 “The CfA Redshift Survey: Data for the NGP +30 Zone”
Huchra, J., Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, Corwin, H., Ap. J. Suppl 72, pp. 433–470
- 1989 “The Luminosity Function for the CfA Redshift Survey Slices”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., Ap. J. 343, pp. 1–17
- 1988 “The Mean Density and Two-Point Correlation Function for the CfA Redshift Survey Slices”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., Ap. J. 332, pp. 44–56
- 1986 “The Shane-Wirtanen Counts: Systematics and Two-Point Correlation Function”
de Lapparent, V., Kurtz, M. J., Geller, M. J., Ap. J. 304, pp. 585–598
- 1986 “A Slice of the Universe”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., Ap. J. (Letters) 302, pp. L1–L5
- 1984 “The Shane-Wirtanen Counts”
Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, M. J. Kurtz, Ap. J. (Letters) 287, pp. L55–L58

Communications invitées dans des congrès internationaux :

- 2005 “Observations of Large-Scale Structure”
de Lapparent, V., in Current Issues in Cosmology, eds. J.-C. Pecker, J. Narlikar (Cambridge University Press, Grande Bretagne)
- 1997 “The Large-Scale Structure of the Universe”
de Lapparent, V., European Review (John Wiley & Sons, Grande Bretagne), *Vol. 5 No. 4*, pp. 419–428
- 1996 “Mapping the Large-Scale Structure”
de Lapparent, V., in Cosmology and Large Scale Structure, Les Houches, Session LX, eds. R. Schaeffer *et al.* (Elsevier Science, Amsterdam), pp. 107–132
- 1994 “Mapping the Large-Scale Structure”
de Lapparent, V., in Astronomy from Wide-Field Imaging, IAU Symposium, No 161, eds. H. T. MacGillivray *et al.* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), pp. 669–686
- 1993 “Mapping the Large-Scale Galaxy Distribution”
de Lapparent, V., in Particle Astrophysics, IVth Rencontres de Blois, eds. J. Tran Thanh Van *et al.* (Editions Frontières, Gif-sur-Yvette), pp. 281–298
- 1989 “The Mean Density from the Galaxy Distribution”
de Lapparent, V., in The Quest for the Fundamental Constants in Cosmology, XXIVth Rencontres de Moriond, eds. J. Audouze *et al.* (Editions Frontières, Gif-sur-Yvette), pp. 103–109
- 1989 “Cosmologie, Sondages Profonds”
de Lapparent, V., in Quels Programmes Prioritaires pour le VLT en 1994/95, ed. D. Al-loin (Observatoire de Paris-Meudon), pp. 281–283
- 1987 “The Center for Astrophysics Redshift Survey: Statistical Measures of Large-Scale Clustering”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., in Thirteenth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, ed. M. Ulmer (World Scientific, Singapore), pp. 281–283

Contributions écrites invitées :

- 1997 “La Structure de l’Univers à Grande Echelle : des Galaxies aux Superamas”
de Lapparent, V., in Compte-Rendus de l’Académie des Sciences, 324 Série Iib, pp. 785–798
- 1991 “Extragalactic Voids”
de Lapparent, V., in The Astronomy and Astrophysics Encyclopedia, ed. J. P. Maran (Van Nostrand Reinhold, New York), p. 952
- 1989 “Des Bulles dans la Distribution des Galaxies”
de Lapparent, V., in Bulletin de la Société Française de Physique, 73, p. 22

Communications dans des congrès internationaux :

- 2008 “An Automatic Method to Determine the Degree of Flocculence of a Galaxy”
Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., Baillard, A., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Mellier, Y., Fouqué, P., Borgne, J.-F. L., Pelló, R., Makarov, D., Makarova, L., Prugniel, P., Arnouts, S. in Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, ASP Conf. Ser., Vol. 394, eds. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, J. R. Lewis (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), pp. 497–499
- 2002 “The different clustering of red and blue galaxies: a robust signal from $\omega(\theta)$ ”
Cabanac, R., **de Lapparent, V.**, Hickson, P. in New Era in Cosmology, ASP Conf. Ser., Vol. 283, eds. T. Shanks & N. Metcalfe. (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), pp. 129–131
- 2002 “The Large Zenith Telescope Survey: a deep survey using a 6-m liquid mirror telescope”
Cabanac, R., **de Lapparent, V.**, Hickson, P. in New Era in Cosmology, ASP Conf. Ser., Vol. 283, eds. T. Shanks & N. Metcalfe (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), pp. 132–134
- 2000 “The Large Zenith Telescope: Redshifts and Physical Parameters of Faint Objects from a Principal Component Analysis”
Cabanac, R., **de Lapparent, V.**, in Clustering at High Redshift, ASP Conf. Ser., Vol. 200, eds. A. Mazure, O. Le Fèvre, & V. Le Brun (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), p. 396
- 1999 “The ESO-Sculptor survey with ISO”
Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent, V.**, Surace, C., The Elais Consortium in The Universe as Seen by ISO, ESA-SP, Vol. 427, eds. P. Cox & M. F. Kessler, p. 1053
- 1998 “The ESO-Sulptor Survey: Galaxy Populations and Luminosity Function at $z \leq 0.5$ ”
Galaz, G., **de Lapparent, V.**, in Wide Field Surveys in Cosmology, 14th IAP meeting, eds. S. Colombi, Y. Mellier & B. Raban (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette), p. 157
- 1998 “Large Zenith Telescope project: a 6-m mercury-mirror telescope”
Hickson, P., Borra, E. F., Cabanac, R., Chapman, S. C., **de Lapparent, V.**, Mulrooney, M., & Walker, G. A. in Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI, Proceedings SPIE, Vol. 3352, ed. L. M. Stepp, pp. 226–232
- 1997 “Spectral Classification of Galaxies with $z \leq 0.5$ ”
Galaz, G., **de Lapparent, V.** in The Early Universe with the VLT, ed. J. Bergeron (Springer, Berlin), pp. 394–395
- 1988 “The Center for Astrophysics Redshift Survey”
Huchra, J. P., Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, R. Burg, in Large Scale Structures of the Universe, IAU Symposium 130, eds. J. Audouze *et al.* (D. Reidel, Dordrecht), pp. 105–112
- 1988 “The Center for Astrophysics Redshift Survey: Luminosity Function and Two-Point Correlation Function”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., in Large Scale Structures of the Universe IAU Symposium 130, eds. J. Audouze *et al.* (D. Reidel, Dordrecht), p. 519

- 1987 “Large-Scale Structure: The Center for Astrophysics Redshift Survey”
Geller, M. J., Huchra, J. P., **de Lapparent, V.**, in Observational Cosmology, IAU Symposium 124, eds. A. Hewitt *et al.* (D. Reidel, Dordrecht), pp. 301–312
- 1986 “The Galaxy Distribution and the Large-Scale Structure of the Universe”
Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, Kurtz, M. J., in Twelfth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Vol. 470, ed. M. Livio (Annals of the New York Academy of Sciences, New York), pp. 123–135
- 1985 “A Slice of the Universe”
Huchra, J. P., **de Lapparent, V.**, Geller, M. J., Kurtz, M. J., Horine, E., Peters, J., Tokarz, S. in Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 17, p. 857

Autres publications spécialisées :

- 1997 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Survey: Large-Scale Structure and Galaxy Populations at $0.1 < z < 0.5$ ”
de Lapparent, V., Galaz, G., Arnouts, S., S. Bardelli, M. Ramella, M., Messenger, 89, pp. 21–28
- 1994 “Possible Gravitational Microlensing Event”
Benetti, S., Pasquini, L., West, R., **de Lapparent, V.** in IAU Circular, Vol. 6069, ed. D. W. E. Green, p. 2
- 1993 “LITE: the Large Imaging Telescope”
Vigroux, L., **de Lapparent, V.**, Mellier, Y., Rich, J., Breuer, H. J., Lorenz, H., Marx, S., Messenger, 71, pp. 44–46
- 1993 “Mapping the Large-Scale Structure with the ESO Multi-Slit Spectrographs”
de Lapparent, V., Bellanger, C., Arnouts, S., Mathez, G., Mellier, Y., and Mazure, A., Messenger, 72, pp. 34–38
- 1991 “Multi-Object Spectroscopy with the ESO Multi-Mode Instrument at the NTT”
Dekker, H., D’Odorico, S., Kotzlowski, H., Lizon, J.-L. Longinotti, A., Nees, W., **de Lapparent-Gurriet, V.**, Messenger, 63, pp. 73–76
- 1989 “A Redshift Survey of Galaxies with $z \leq 0.6$ using Multi-Object Spectroscopy”
de Lapparent, V., Mazure, A., Mathez, G., Mellier, Y., Messenger, 55, pp. 5–6
- 1988 “Possible Supernovae”
Hansen, L., Norgaard-Nielsen, H. U., Jorgensen, H. E., Ellis, R., Couch, W., Allington-Smith, J., **de Lapparent, V.**, Mazure, A. in IAU Circular, Vol. 4641, ed. B. G. Marsden, p. 1
- 1986 “Les Grandes Structures dans la Distribution des Galaxies”
de Lapparent, V., Thèse de Doctorat, Université Paris 7

Contributions invitées pour diffusion des connaissances :

- 1997 “La Structure de l’Univers à Grande Echelle : des Galaxies aux Superamas”
de Lapparent, V., in Compte-Rendus de l’Académie des Sciences, *324 Série IIB*, pp. 785–798
- 1991 “Extragalactic Voids”
de Lapparent, V., in The Astronomy and Astrophysics Encyclopedia, ed. J. P. Maran (Van Nostrand Reinhold, New York), p. 952
- 1990 “Les Bulles de l’Univers”
de Lapparent, V., Ciel & Espace, *251*, p. 48
- 1990 “Un Univers en Forme de Bulles”
de Lapparent, V., Science & Vie Hors-Série, *170*, p. 126
- 1989 “Des Bulles dans la Distribution des Galaxies”
de Lapparent, V., in Bulletin de la Société Française de Physique, *73*, p. 22

Liste des articles choisis

Pour compléter les différents chapitres de ce mémoire, nous proposons au lecteur les huit articles ci-dessous. Ceux-ci insérés dans les chapitres correspondants, selon les numéros de pages indiqués.

Relevé ESO-Sculpteur

1. The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: Spectral Classification at $z \leq 0.5$,
Galaz, G., **de Lapparent, V.**,
1998, *A&A* 332, pp. 459–478 31
2. Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances,
Bellanger, C., **de Lapparent, V.**,
1995, *Ap. J. Lett.* 455, pp. L103–L107 59
3. Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1–0.5,
de Lapparent, V., Slezak, E.,
2007, *A&A* 472, pp. 29–49 69
4. The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts 0.1–0.5,
de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S.,
2003, *A&A* 404, pp. 831–860 123
5. Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift surveys,
de Lapparent, V.,
2003, *A&A* 408, pp. 845–872 157
6. The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1–0.5,
de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S.,
2004, *A&A* 422, pp. 841–863 189

Catalogue EFIGI

7. The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology,
Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A., Tasca, L.,
2011, *A&A*, sous presse, astro-ph/1103.5734 241
8. The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology. II. Statistical properties along the Hubble sequence,
de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E.,
2011, *A&A*, sous presse, astro-ph/1103.5735 275

Université Pierre et Marie Curie, Paris 6

NOTICE DE TRAVAUX ET ACTIVITÉS

en vue du diplôme

d'Habilitation à Diriger des Recherches

présentée par

Valérie de Lapparent

**Spectroscopie, spectrophotométrie, et morphométrie :
Mérites et faiblesses pour la caractérisation des
Populations de galaxies et leur distribution spatiale**

A soutenir le 9 juin 2011, à l'Institut d'Astrophysique de Paris

par devant les membres du jury

Chantal Balkowski	Astronome, GEPI, Observatoire de Meudon	Rapporteure
Andrea Biviano	Chargé de recherche, Observatoire de Trieste	Rapporteur
Alessandro Boselli	Directeur de recherche, Lab. d'Astrophysique de Marseille	Examinateur
Guilaine Lagache	Astronome, Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay	Rapporteure
Gary Mamon	Astronome, Institut d'Astrophysique de Paris	Examinateur
Sophie Maurogordato	Chargée de recherche, Observatoire Nice-Côte d'Azur	Examinatrice

Table des matières

I	PRÉAMBULE	5
	Remerciements	9
	Synthèse en français	11
	Synthèse en anglais	13
	Introduction générale	15
II	LE RELEVÉ SPECTRAL ESO-SCULPTEUR	17
1	Acquisition des données	19
1.1	Collaborateurs	19
1.2	L'opportunité nouvelle des programme-clés	19
1.3	Motivations et contexte scientifique	20
1.4	Observations	20
1.4.1	Choix du champ sur le ciel	20
1.4.2	Choix d'un relevé digital	21
1.4.3	Choix des instruments d'observation	21
1.4.4	Stratégie d'observation	22
1.4.5	Choix des filtres et des magnitudes limites des catalogues	23
1.4.6	Répartition temporelle et déroulement des observations	23
2	Traitements et catalogues	25
2.1	Collaborateurs	25
2.2	Catalogue photométrique	26
2.3	Catalogue spectroscopique	27
2.4	Calibration en flux, classification spectrale, et corrections-k	29
2.5	<i>Article choisi n° 1</i>	31
3	Structuration à grande échelle	53
3.1	Introduction	53
3.2	Un pinceau à travers la toile cosmique	55
3.3	<i>Article choisi n° 2</i>	59

3.4	Fonctions de corrélation par type	67
3.5	<i>Article choisi n° 3</i>	69
3.6	Fluctuations à très grande échelle	93
3.7	Comparaison avec les simulations du Millennium	97
4	Décalages et types photométriques	109
4.1	Comparaison des décalages spectraux	109
4.2	Comparaison des types spectraux	111
4.3	Effets dus à l'orientation des fentes	113
4.4	Détection des fluctuations à très grande échelle	116
5	Fonctions de luminosité et évolution	119
5.1	Introduction	119
5.2	Collaborateurs	120
5.3	Fonctions de luminosité par classe spectrale	120
5.4	<i>Article choisi n° 4</i>	123
5.5	Biais dans les fonctions de luminosité par type	155
5.6	<i>Article choisi n° 5</i>	157
5.7	Evolution des galaxies spirales tardives	187
5.8	<i>Article choisi n° 6</i>	189
6	Suivi en infrarouge-moyen avec ISO	215
6.1	Introduction	215
6.2	Collaborateurs	215
6.3	Catalogue à $12\mu\text{m}$	215
6.4	Modélisation des comptages à $12\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$	217
6.5	Propriétés des sources à $12\mu\text{m}$	218
	Références	225
III	LE CATALOGUE MORPHOLOGIQUE EFIGI	231
1	Introduction	233
1.1	Les catalogues morphologiques	233
1.2	Liens entre les caractéristiques spectrales et morphologiques des galaxies	233
1.3	Statut actuel de la morphométrie des galaxies	234
2	Morphologie visuelle	237
2.1	Collaborateurs	237
2.2	Echantillon étiqueté EFIGI	238
2.3	<i>Article choisi n° 7</i>	241
2.4	Description statistique de la séquence de Hubble	271
2.5	Galaxies naines spirales	273
2.6	<i>Article choisi n° 8</i>	275

3 Morphologie automatique	297
3.1 Erreurs de photométrie dans le relevé SDSS	297
3.2 Séquence couleur-magnitude	301
3.3 Comparaison avec les types spectro-photométriques	304
3.4 Fonctions de luminosité par type	307
3.5 Couleurs des bulbes et disques	312
Références	312
 IV CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	 317
Références	325
 V EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE ET PUBLICATIONS	 327
Curriculum Vitae	329
 1 Expérience professionnelle	 331
1.1 Encadrement	331
1.1.1 Stagiaires	331
1.1.2 Doctorants	331
1.1.3 Post-Doctorants	331
1.2 Responsabilités scientifiques	331
1.3 Animation de la recherche	332
1.4 Responsabilités administratives	332
1.5 Diffusion de la connaissance scientifique	332
1.5.1 Conférences grand public	333
1.5.2 Conférences d'éveil et de formation	334
 2 Publications	 337
Liste des articles choisis	343

Première partie

PRÉAMBULE

“Les Nébuleuses.
A qui parles-tu donc, flocon lointain qui passes?
A peine entendons-nous ta voix dans les espaces.
Nous ne te distinguons que comme un nimbe obscur
Au coin le plus perdu du plus nocturne azur.
Laisse-nous luire en paix, nous, blancheurs des ténèbres,
Mondes spectres éclos dans les chaos funèbres,
N’ayant ni pôle austral ni pôle boréal;
Nous, les réalités vivant dans l’idéal,
Les univers, d’où sort l’immense essaim des rêves,
Dispersées dans l’éther, cet océan sans grèves,
Dont le flot à son bord n’est jamais revenu;
Nous les créations, îles de l’inconnu !”

Victor Hugo

“Abîmes”, “La légende des Siècles” (1877)

“A certain amount of vastness constitutes majesty. More than that seems insane.”

John Updike

“At the hairy edge of the possible”, “More Matters. Essays and criticism” (1999).

Remerciements

Je salue l'enthousiasme d'André Brahic sur lequel je me suis appuyée pour me maintenir dans la voie de l'astrophysique, malgré les fortes incitations venant de l'Ecole Normale Supérieure pour une orientation en chimie, puis en physique fondamentale des systèmes quantiques. C'est Bernard Jones qui m'a donné, au cours d'un stage sur la modélisation à N-corps de la fusion des galaxies, le goût de l'étude de ces systèmes grandioses et complexes, et qui m'a suggéré de prendre contact avec les chercheurs de Harvard.

Je ne peux m'empêcher de penser à Margaret Geller, au regretté John Huchra, et à Irwin Shapiro. De façon unanime, ils ont accepté de m'accueillir au Harvard-Smithsonian CfA et m'ont permis de concrétiser pendant ma thèse ce vif désir d'observer et de cartographier la distribution des galaxies à grande échelle, puis d'en mesurer les propriétés statistiques. Margaret et John m'ont imprégnée d'un niveau d'exigence dans l'acquisition, le traitement et l'interprétation des données qui me poursuit quotidiennement.

Après les cinq années passées à Cambridge, l'accueil chaleureux de Jean Audouze, Daniel Kunth et Jean-François Sygnet à l'IAP m'a aidé à intégrer progressivement le laboratoire, où j'ai découvert l'intelligence et le dévouement du personnel administratif et technique.

Je remercie sincèrement mes collaborateurs Christelle Bellanger, Stéphane Arnouts, Gaspar Galaz et Sandro Bardelli pour leur participation compétente et efficace au programme-clé de l'ESO, grâce à laquelle le projet a pu aboutir et tirer tout le profit de ces nombreuses nuits de télescope sur le NTT à La Silla, ceci malgré la quasi-absence d'aide technique aux observations et au traitement des données. Leur intérêt scientifique pour ce projet jusqu'à son terme m'ont aidé à tenir bon pendant les années ingrates du traitement des données de spectroscopie multi-objet.

Je remercie tout particulièrement Emmanuel Bertin pour nos échanges quotidiens autour de nos projets communs, dont le niveau d'exigence n'a jamais pesé sur la confiance et les égards mutuels. Je ne peux que lui exprimer ma joie de pouvoir mener, grâce à notre collaboration, des recherches de "rêve" : analyser les meilleures images astronomiques au moyen de logiciels à l'avant-garde de l'analyse des sources, dans le but de déchiffrer les secrets de l'évolution des galaxies.

Je suis reconnaissante envers Yannick Mellier pour le travail monumental qu'il a effectué en initiant et en coordonnant le centre TERAPIX de traitement des grandes images provenant du TCFH, qui nous fournit ces images magnifiques des champs du CFHTLS, ainsi qu'envers Laurent Vigroux pour avoir joué un rôle clé dès le début de ce projet phare pour la communauté internationale. De nombreuses questions astrophysiques n'ont pas encore été explorées via ces données, et la collaboration démarrée à l'IAP avec Emmanuel Bertin, Damien Le Borgne et Michel Fioc me promet que notre curiosité sera satisfaite.

Je tiens par ailleurs à exprimer ma gratitude à Florence Durret, Roya Mohayaee et Jacques Colin pour leur soutien professionnel et amical durant les années passées, ainsi qu'à Johanna et Frédéric pour leur soutien moral inestimable. Mes pensées vont aussi vers les personnes remarquables, dont tout particulièrement René Cavaroz, qui veillent à la diffusion de la connaissance de l'astrophysique auprès des scolaires, des enseignants et du grand public, et m'invitent régulièrement à transmettre mon savoir dans les diverses conférences qu'ils organisent. Enfin, je remercie vivement mes trois rapporteurs Chantal Balkowski, Guilaine Lagache et Andrea Biviano, pour avoir accepté de prendre en charge le long de travail de lecture et d'appréciation de ce mémoire.

Synthèse en français

Le programme-clé ESO-Sculpteur a fourni le tout premier catalogue avec photométrie CCD et spectroscopie de fente pour un relevé systématique d'environ un millier de galaxies. Son taux de complétude élevé permet une cartographie fiable des vides et feuillets interceptés le long de la ligne de visée jusqu'à $z \simeq 0.5$. En distinguant les populations de galaxies géantes et naines, nous proposons des analyses originales des fonctions de luminosité et de corrélation, ainsi que la détection d'une évolution marquée des galaxies spirales tardives et des irrégulières. Un suivi infrarouge moyen permet de déduire une modélisation des comptages avec évolution "minimale".

Une sur-densité est détectée à $z \simeq 0.44$ dans le relevé ESO-Sculpteur, précédée par une sous-densité à $z \sim 0.36$. Ces structures définissent des régions de contraste ~ 2 sur 170 à 200 Mpc le long de la ligne de visée. En prenant en compte le regroupement spatial mesuré des galaxies, on évalue le niveau de significativité de la sur-densité à 2.6 à 3.3σ . Si elle s'étendait transversalement sur $2 \times 2 \text{ deg}^2$, cette structure pourrait atteindre un niveau de significativité de 4 à 5σ . Des pinceaux profonds ayant la même géométrie sur le ciel que le relevé ESO-Sculpteur sont extraits des simulations "Millennium", et confirment que la probabilité de détecter une telle sur-densité dans un volume cosmologique est de l'ordre du pourcent.

En outre, je teste les performances des méthodes de décalages vers le rouge "photométriques" pour la détection de ces très grandes fluctuations de densité, en complétant la photométrie optique par la photométrie infrarouge simulée par ZPEG à partir des mesures optiques et des ajustements des scénarios évolutifs de PÉGASE.2. On montre que les biais systématiques dans l'ajustement des spectres peuvent empêcher la détection des très grandes structures, même si les erreurs aléatoires de la photométrie causent un étalement en décalage spectral sur des échelles bien inférieures. On compare aussi les performances des ajustements de spectres synthétiques avec la classification spectrale par composante principale. Je montre enfin la présence d'effets systématiques sur la classification spectrale causés par l'orientation des fentes de spectroscopie.

Je présente ensuite les caractéristiques du catalogue morphologique de galaxies proches EFIGI. Par l'ajustement de profils convolués à double composante de bulbe et de disque, nous dérivons de nouvelles magnitudes totales qui mettent en évidence des pertes de flux de 0.5 à 10 magnitudes dans les mesures photométriques produites par le relevé SDSS pour ces objets proches; celle-ci sont causées par un mauvais ajustement du fond de ciel autour des grandes galaxies, et par un morcellement des objets sans bulbe dominant. Ces nouvelles mesures exhibent un décalage continu dans le diagramme couleur-magnitude des différents types morphologiques de galaxies, qui contraste avec la notion de bi-modalité. Je montre aussi que les couleurs des bulbes des galaxies spirales sont proches des couleurs des galaxies elliptiques, avec un rougissement des bulbes des galaxies Sb et Sbc, les plus riches en poussières. En revanche, on observe un bleuissement progressif des couleurs des disques, depuis ceux des lenticulaires, de même couleur que leurs bulbes, vers les disques des spirales les plus tardives.

J'utilise ainsi les catalogues ESO-Sculpteur et EFIGI pour illustrer les enjeux et difficultés dans la caractérisation des différents types de galaxies dans l'Univers proche et lointain par une analyse des fonctions de luminosité. Celles-ci sont biaisées par les confusions entre les différents types morphologiques de galaxies qui se produisent lorsque la séparation est basée sur la classification spectrale, sur les couleurs, ou sur les types spectro-photométriques. Ces effets peuvent avoir des répercussions majeures dans la dérivation de contraintes observationnelles sur l'évolution des galaxies.

Synthèse en anglais

Introduction générale

A l'aube du 21^{ème} siècle, les astrophysiciens ont obtenu des réponses à plusieurs questions fondamentales sur l'Univers qui nous entoure. L'observation du rayonnement cosmologique à 2.7° K a permis de préciser les propriétés des fluctuations primordiales de densité et les paramètres cosmologiques (Bennett et al. 1996; MacTavish et al. 2006; Dunkley et al. 2009). Ces résultats sont en bon accord avec l'expansion accélérée de l'Univers mise en évidence par l'observation des supernovae maintenant (Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999), et les mesures de la constante de Hubble par l'observation des céphéides avec le Hubble Space Telescope (Freedman et al. 2001). Ces observations cosmologiques sont par ailleurs cohérentes avec la répartition des galaxies à grande échelle dans le cadre d'un effondrement gravitationnel de fluctuations gaussiennes du champ de matière, comme le révèlent les distortions dans l'espace des décalages vers le rouge (Hawkins et al. 2003; Guzzo et al. 2008). La distribution des galaxies recèle en outre des informations mesurables sur les oscillations baryoniques acoustiques, témoins des premiers instants de l'Univers (Eisenstein et al. 2005; Percival et al. 2007), et qui confirment le rôle de la gravitation et de la matière noire dans la formation des structures, et qui fournissent une échelle standard qui peut être mesurée à différents décalages vers le rouge.

Pourtant, la compréhension de la séquence de phénomènes ayant conduit à l'immense diversité des galaxies observées n'en est qu'à l'étape du défrichage. Les grands relevés effectués au tournant du siècle, après qu'ils soit apparu indispensable d'effectuer des analyses statistiques fiables fournissent des observations dans de grands volumes de l'Univers, que ce soit l'Univers proche (2dFGRS, SDSS, "Millennium"; Colless et al. 2003a; Adelman-McCarthy et al. 2008; Cross et al. 2004) ou à grande distance (DEEP2, VVDS; Davis et al. 2003, 2007; Garilli et al. 2008): ces données produisent de nombreux résultats prometteurs sur l'évolution des galaxies (Driver et al. 2005; Wake et al. 2006; Cimatti et al. 2006; Zucca et al. 2006; Franzetti et al. 2007; De Propris et al. 2007; Vergani et al. 2008; Cooper et al. 2008; Coil et al. 2008). La difficulté réside cependant dans la comparaison des observations de l'Univers lointain avec l'Univers local ou à faible décalage vers le rouge, ainsi que la mise en relation des différentes populations de galaxies détectées. Les limites sont liées au mode d'observation (spectroscopie à fente ou à fibre), à la qualité des images (différences d'échantillonnage et de réponse impulsionnelle), et aux indicateurs statistiques (décalages spectraux ou photométriques; types morphologiques, spectraux, ou spectro-photométriques).

Les simulations numériques à N-corps avec matière noire et gaz montrent qu'à l'intérieur des halos de matière noire (aux échelles de l'ordre du Mpc et en dessous), les effets de marée et de fusion façonnent les propriétés et les proportions des différents types de galaxies (Pomarède et al. 2009; Bournaud et al. 2011). Les observations et modélisations théoriques suggèrent que les effets d'accrétion et de rétroaction jouent par ailleurs un rôle important dans la régulation de la formation d'étoiles (Kaviraj et al. 2007; Ocvirk et al. 2008; Oppenheimer et al. 2010; voir aussi Silk 2011). Cependant, les simulations numériques existantes sont insuffisantes pour reproduire la diversité des galaxies observées dans des volumes cosmologiques (c'est-à-dire de l'ordre du gigaparsec), la résolution ne pouvant être accrue qu'au détriment du volume. Celle-ci est cependant nécessaire pour modéliser la formation d'étoiles lors des collisions de galaxies (Teyssier et al. 2010). Par ailleurs, si des modèles semi-analytiques prédisent avec succès les distributions de comptages, les détails du regroupement des galaxies de différentes masses et couleurs sont contredites par les observations (de la Torre et al. 2011).

Les galaxies observées se distinguent les unes des autres par leur masse, leur forme, leur dynamique, leur contenu spectral, et montrent des comportements collectifs en lien avec ces descripteurs. Les simulations numériques existantes montrent que ces descripteurs sont étroitement liés aux divers processus

en jeu dans la formation des galaxies (relaxation violente et dissipation, instabilité dynamique, formation d'étoiles, effets de marées), donnant ainsi accès à l'histoire des galaxies (Widrow et al. 2003; Debattista et al. 2004; Athanassoula 2005; Puech et al. 2010; Scannapieco et al. 2010; Bois et al. 2010; Guedes et al. 2011; Cappellari et al. 2011). Une mesure fiable de ces descripteurs est donc nécessaire si l'on souhaite comprendre la physique des galaxies, ainsi que la part des conditions initiales et celle des effets d'environnement. La masse et le contenu spectral des galaxies sont habituellement dérivés de la distribution en énergie spectrale des objets, par l'ajustement de spectres à la photométrie multi-bande. La dynamique est obtenue à partir des mesures de spectroscopie intégrale de champ (Puech et al. 2007). Quant à établir la forme des objets, cela nécessite des images bien résolues et des outils performants d'ajustement de profils. Les travaux cités indiquent que c'est pourtant un paramètre clé : les différentes histoires de formation des bulbes et des disques ainsi que des accrétions et fusions de galaxies conduisent à des objets distincts morphologiquement.

Aux limitations des observations et des simulations numériques s'ajoutent les problèmes de biais systématiques dans les mesures observationnelles. Ceux-ci peuvent être inhérents aux algorithmes de mesure, ou liés à certaines propriétés des objets. Dans la première catégorie se trouvent les problèmes de photométrie, qui sont récurrents dans l'histoire de l'astronomie. On mentionnera par exemple l'erreur d'échelle de magnitude du catalogue de plaques photographiques de l'hémisphère sud, obtenu par numérisation avec la machine APM ("Automatic Plate Measuring"), et les conséquences que cela pouvait avoir sur l'interprétation en terme d'évolution des galaxies (Maddox et al. 1990c; Bertin & Dennefeld 1997). Le "Sloan Digital Sky Survey" (SDSS) a résolu les problèmes d'uniformité de point-zéro et de vignettage, inhérents aux relevés couvrant le ciel par la juxtaposition de nombreuses plaques photographiques (de Lapparent et al. 1986b; Maddox et al. 1990b,a). Néanmoins, je montre ici que les détails de l'extraction de source, du calcul du fond de ciel et d'ajustement des profils peuvent conduire à des biais systématiques substantiels pour les galaxies proches du relevé SDSS, celles qui sont pourtant les mieux résolues et qui devraient servir d'étalon pour l'étude de l'Univers lointain.

Concernant les biais liés aux objets eux-mêmes, on mentionnera le fait que les galaxies se présentent avec des orientations différentes sur le ciel, ce qui conduit d'une part à des effets systématiques dans la photométrie des objets, avec un rougissement et une sous-estimation des flux pouvant atteindre 1 à 2 mag. (Driver et al. 2007), et à la possibilité de biais dans les estimations de masse stellaire (Graham & Worley 2008). La combinaison de l'orientation des galaxies sur le ciel avec les contraintes techniques des observations de spectroscopie (fentes alignées selon une même direction dans un champ de spectroscopie multi-objet; fibre optique centrée sur le bulbe des objets) peuvent conduire à des différences notables dans les propriétés spectrales des galaxies (voir par exemple Kewley et al. 2005). Dans ce mémoire, j'utilise les différents relevés auxquels j'ai participé pour évaluer ces divers biais et leur impact sur la caractérisation des différentes populations de galaxies.

Dans un premier temps, je décris le relevé ESO-Sculpteur, un programme-clé de l'ESO que j'ai mené à terme avec succès. Grâce à 70 nuits de temps d'observation sur le 3.5 m-NTT de La Silla, nous avons constitué des catalogues photométriques et spectroscopiques qui ont conduit à de nouvelles analyses concernant les fonctions de luminosité et le regroupement spatial des galaxies, ainsi qu'à un suivi infrarouge moyen. Ce programme a rendu possible l'accomplissement de trois thèses de doctorat.

Dans un deuxième temps, je décris le catalogue morphologique EFIGI, donc j'ai pris la co-responsabilité avec E. Bertin, qui a conduit également à une thèse de doctorat. Ce programme contient deux volets, une analyse visuelle par attributs morphologiques, et une analyse automatique de mesure des flux et des rayons d'échelle des galaxies, ainsi que de leurs composantes de bulbe et disque par ajustement de profils convolués. Je présente ici les mesures de flux, et je les utilise pour montrer les biais entre les types morphologiques et les types spectraux des galaxies, qui ne peuvent manquer d'affecter les relevés lointains. Dans la dernière partie je résume mes activités et mon expérience professionnelle, et je présente ma liste de publications.

J'utilise dans ce mémoire les paramètres cosmologiques suivants :

- $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$ (Freedman et al. 2001)
- $\Omega_m = 0.3$ and $\Omega_\Lambda = 0.7$ (Dunkley et al. 2009)

Deuxième partie

LE RELEVÉ SPECTRAL ESO-SCULPTEUR

Chapitre 1

Acquisition des données

1.1 Collaborateurs

- Christèle Bellanger (alors doctorante IAP),
- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au TCFH, en détachement du Lab. d'Astrophysique de Marseille),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l'Univ. Pontificia Católica, Chili),
- Guy Mathez (LAOMP, Toulouse),
- Alain Mazure (actuellement au LAM, Marseille),
- Yannick Mellier (actuellement à l'IAP).

1.2 L'opportunité nouvelle des programme-clés

Le relevé ESO-Sculpteur a été rendu possible par la mise en place des “programmes-clé” en 1989, par Harry Van der Laan, alors récent directeur général de l'ESO. La mise en service imminente du NTT conduisait à un supplément de nuits d'observations. En répartissant ce temps supplémentaire sur les différents télescopes, pondéré en fonction de la taille des miroirs, on pouvait estimer que cela conduisait à 2000 nuits supplémentaires sur une période de 4 ans, dont la moitié sur le 3.6 m et le NTT. H. Van der Laan proposait d'utiliser ces nuits supplémentaires d'une nouvelle façon van der Laan (1988b).

L'analyse de la distribution des missions d'observations en fonction du nombre de nuits allouées montrait que la majorités des attributions et temps étaient de 2 à 3 nuits pour le 3.6 m et le 2.2 m, de 3 à 5 nuits pour les 2 télescopes de 1.5 m, et de 4 à 8 nuits pour le 1.4 m. Harry Van der Laan proposait d'offrir la possibilité d'une attribution garantie de 15 à 50 nuits de télescopes sur une période de 1 à 4 ans pour des programmes scientifiques pour lesquels un échantillon statistique nécessitant un grand nombre de nuits de télescope était indispensable van der Laan (1988b). Ces programmes ne devaient pas être la simple accumulation d'un grand catalogue, mais devaient répondre à une question-clé de l'astrophysique avec des objectifs spécifiques et une stratégie bien structurée.

Après un appel d'intention au printemps 1988, 60 réponses parvinrent pour un temps total d'observation estimé de ~ 1850 nuits sur le 3.6 m et le NTT, et 1550 nuits sur le 2.2 m les 2.5 m et les 1.4 m, soit 3400 nuits au total (van der Laan 1988a). L'appel à proposition fut lancé avec une attribution de 125 nuits sur les 3.6 m et le NTT pour la première année (1989), et un objectif de 240 nuits par an sur ces mêmes télescopes pour les années suivantes (van der Laan 1989).

Le système des “programme-clés”, innové par Van der Laan sur les télescopes de l'ESO, inspira ensuite d'autres observatoires et a conduit aux “Key-Projects” avec le Télescope Spatial de Hubble, et aux “Large Programmes” à l'ESO et au Télescope Canada-France-Hawaii (TCFH). L'avènement d'instruments de plus en plus performants pour effectuer des relevés extra-galactiques comme MEGACAM au TCFH,

et VIMOS au VLT, permet aussi la mise en place de programmes de type “Legacy”. Ces programmes sont des grands relevés effectués par des équipes compétentes pour mener à bien les observations et le traitement des données de haute qualité, les données traitées étant ensuite mises à la disposition de toute la communauté.

1.3 Motivations et contexte scientifique

Le système des programme-clés était indispensable à la réalisation de relevés de galaxies, pour lesquels un grand volume de l’Univers doit être sondé afin qu’il soit représentatif de la distribution et permette des analyses quantitatives fiables. Des groupes de chercheurs américains avaient pu effectuer de tels relevés grâce à des télescopes appartenant à leur laboratoire ou à un groupe de laboratoires. C’est dans ce cadre qu’avait été effectué l’acquisition du relevé du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) : un relevé complet de galaxies avec décalage spectral et magnitude B limite de 14.5 (Huchra et al. 1983), utilisant le télescope de 1.5 m du “Fred Lawrence Whipple Observatory” appartenant au CfA, et situé à Mount Hopkins dans l’Arizona.

En attribuant la moitié du temps de ce télescope, c’est-à-dire toutes les nuits sombres, le relevé spectroscopique du CfA a pu être étendu jusqu’à la magnitude B limite de 15.5. Ces cartes eurent un impact important, car elles révélèrent pour la première fois la structure cellulaire de la distribution des galaxies (de Lapparent et al. 1986a). Elle ont aussi participé à faire évoluer la façon de concevoir l’attribution du temps de télescope, par la prise de conscience que la communauté devait non seulement investir une large fraction de son temps de télescope sur des projets de relevés systématiques, mais aussi dédier des petits télescopes pour de tels projets. Le relevé SDSS fut conçu dans cet esprit.

La découverte de la structure cellulaire de la distribution des galaxies à grand échelle (de Lapparent et al. 1986a), et l’existence d’un “mur” de galaxies sur environ 200 Mpc (Geller & Huchra 1989) conduisait naturellement à se poser la question de la taille maximale des vides et feuillets détecté, celle-ci étant forcément limitée afin d’être compatible avec l’isotropie du rayonnement cosmologique à 2.7 deg. K (Bennett et al. 1996). Il était de surcroît naturel de se demander si l’alternance de vides et feuillets se prolongeait à plus grand décalage spectral.

L’autre motivation du programme était d’examiner les effets d’évolution des galaxies individuelles sur l’intervalle de décalage vers le rouge 0.1 – 0.5. Au vu des résultats récents montrant l’excès de galaxies bleues dans les comptages profonds Tyson (1988), et l’excès de galaxies bleues dans les amas de galaxies à $z \simeq 0.3$, il était légitime de s’interroger sur la nature des galaxies causant ce bleuissement, et sur leur répartition spatiale.

1.4 Observations

Compte-tenu des objectifs scientifiques et des performances instrumentales du moment, il me sembla opportun d’obtenir la photométrie et la spectroscopie d’environ un millier de galaxies de champ jusqu’à un décalage spectral de 0.5 et une magnitude limite équivalente à $B \simeq 22$. L’acquisition du relevé photométrique par *imagerie CCD*, et un suivi spectroscopique *complet* furent posés comme critères incontournables du projet.

1.4.1 Choix du champ sur le ciel

Afin de minimiser l’extinction galactique, le champ fut choisi à proximité du pôle sud galactique (dans la constellation du Sculpteur), ce qui impliquait une déclinaison voisine de la latitude de l’observatoire de La Silla, et présentait donc l’avantage d’observer avec une masse d’air inférieure à 1.4.

Afin d’échantillonner largement la distribution des galaxies, il fallait choisir un champ dans lequel il n’y avait pas d’amas riche de galaxies, et qui aurait conduit à consacrer une grande partie du temps d’observation sur ce système, au détriment de l’exploration des grandes structures. Les amas d’avant-plan

pouvaient être évités a priori grâce au catalogue d’Abell (1958), et plusieurs régions proches du pôle sud galactique et dénuées de tout amas d’Abell étaient envisageables. J’ai examiné ces régions à l’oeil à partir des plaques photographiques de Schmidt (ESO), dont des copies sur papier étaient disponibles à l’IAP. Certaines contenaient des amas riches d’arrière plan (à un décalage spectral de 0.3 – 0.5), pour lesquels le catalogue d’Abell est largement incomplet : ceux-ci sont visibles à l’oeil sous la forme d’une sur-densité de galaxies à la limite de la plaque photographique.

La région que j’ai choisie est dénuée d’amas proches d’avant et d’arrière-plan, tout en montrant un grand nombre de galaxies faibles apparemment “de champ”. Les coordonnées de la région choisie sont indiquées dans la Table 1.4.1 1, ainsi que la latitude galactique et l’étendue angulaire du relevé.

TAB. 1.1 – *Localisation du relevé ESO-Sculpteur*

R.A., DEC.	b^{II}	Aire couverte en Photométrie	Aire couverte en Spectroscopie
centre	[deg]	[deg ²]	[deg ²]
$0^{\text{h}}22^{\text{m}}30^{\text{s}}, -30^{\circ}06'$	-83	$0.24 \times 1.53 = 0.37$	$0.24 \times 1.03 = 0.26$

1.4.2 Choix d’un relevé digital

À l’époque à laquelle le programme a démarré, il n’existait pas de relevé profond CCD du ciel, et le seul relevé du ciel austral était le catalogue de Maddox et al. (1990b), obtenu à partir des plaques photographiques du télescope UK Schmidt, numérisées par la machine APM (“Automated Plate Measurement”) jusqu’à une magnitude limite $B_J \simeq 22$.

Au cours de ma thèse, j’avais mis en évidence les variations de point-zéro et les effets de vignettage (obscurcissement des objets à la périphérie des plaques) qui affectaient le catalogue de Shane et Wirtanen (Geller et al. 1984). Nous avons ensuite évalué les biais qui en résultaient sur les mesures du regroupement spatial (de Lapparent et al. 1986b), et remettaient en cause les modélisations de Groth & Peebles (1977). Il fut montré que des effets analogues entâchaient le catalogue de l’APM (Maddox et al. 1990a; Bertin & Dennefeld 1997), biaisant les modélisations de Maddox et al. (1990c).

Au vu de ces problèmes d’hétérogénéité des catalogues basés sur les plaques photographiques, il nous a semblé judicieux de ne pas utiliser le catalogue APM, et d’acquérir la photométrie du relevé ESO-Sculpteur par imagerie CCD, afin de bénéficier non seulement d’une meilleure homogénéité, mais aussi d’une garantie de sensibilité et de linéarité.

1.4.3 Choix des instruments d’observation

L’instrument EFOSC (“ESO Faint Object Spectrograph and Camera”) qui venait d’être installé sur le télescope de 3m60 de l’ESO offrait l’opportunité nouvelle de coupler l’acquisition de la photométrie et de la spectroscopie sur le même télescope (Buzzoni et al. 1984). Après 3 nuits d’observations sur le télescope de 3.60 m à La Silla en août 1987, avec mes collaborateurs Yanick Mellier, Guy Mathez, et Alain Mazure, nous avons prouvé la faisabilité du projet. Cela a conduit à l’attribution de 3 nuits supplémentaire en août 1988.

Au cours de ces deux missions nous avons obtenu les images dans la bande R d’une région du ciel de 172 minutes-d’arc-carrés. Durant la même mission, au cours de l’après-midi, nous sélectionnions à l’oeil les galaxies avec une magnitude plus brillante que 20.5 en R. Puis nous utilisions le nouvel instrument PUMA2 (“Punching Machine”), la copie de la machine conçue par le groupe de Toulouse et installée au Télescope Canada-France-Hawaï, permettant de percer des trous et fentes sur des plaques métalliques afin d’effectuer la spectroscopie simultanée de plusieurs galaxies d’un champ donné (Fort et al. 1986). Nous pouvions effectuer les observations spectroscopiques dès la nuit suivante, et obtenir en 2 fois 1h30 les spectres de galaxies à $R \simeq 20.5$ avec un rapport signal-sur-bruit de 10 dans le continu, pour environ 10 galaxies dans un champs de 5x3 minutes d’arc-carré.

L'avènement des programme-clés (voir Sect. 1.2) nous a conduit à réviser la stratégie et l'ampleur de notre programme, et à proposer un programme-clé, qui fut accepté en février 1989 (de Lapparent et al. 1989a). Ces programmes étant particulièrement nouveaux, H. Van der Laan appelait personnellement les P.I. des projets pour leur annoncer l'acceptation de leur proposition. Nous avons ainsi obtenu une attribution garantie de 60 nuits sur les 65 demandées sur les télescopes de 3.6 m et le NTT (de Lapparent et al. 1989b).

En octobre 1990, lors de l'installation d'EMMI ("ESO multi-mode instrument"; D'Odorico 1990) sur le tout nouveau NTT ("New Technology Telescope"), ayant un miroir de 3.50 m de diamètre ajusté par optique active (Tarenghi & Wilson 1989), les champs du relevé ESO-Sculpteur ont été utilisés pour effectuer un test de faisabilité technique de spectroscopie multi-objet (Dekker et al. 1991). Les spectres obtenus furent d'excellente qualité compte-tenu de la faible brillance de surface de certaines des galaxies observées. EMMI sur le NTT était ainsi parfaitement adapté à réalisation du programme ESO-Sculpteur, par sa meilleure qualité d'image, sa sensibilité accrue et sa plus grande couverture de champ en imagerie et spectroscopie par rapport à EFOSC. Le comité d'attribution du temps de télescope, a alors accepté de transférer notre programme sur le NTT à partir d'Octobre 1991, ce qui a permis d'accélérer d'au moins un facteur 2 le rythme d'obtention des données, et garantissant dans le temps d'observation total imparti, de pouvoir atteindre la couverture du ciel initialement visée (de Lapparent et al. 1993).

1.4.4 Stratégie d'observation

Afin de couvrir les 0.24×1.53 degré-carré sur ciel par des images CCD dont les plus grandes mesurait 9 minute d'arc de côté (CCD Loral sur EMMI au NTT; Arnouts et al. 1997), il fallait paver le champ avec une mosaïque d'images. Au total, 27 à 30 champs furent obtenus en *B*, *V*, *R* avec EFOSC, et 21 à 25 champs en *B*, *V*, *R* avec EMMI. Sauf sur les bord du relevé, chaque image CCD fut obtenue par un décalage de coordonnées de 90% de la taille du CCD en ascension droite et en déclinaison, ce qui assurait des zones communes nombreuses entre les images adjacentes, qui furent ensuite utilisées pour améliorer l'homogénéité de la photométrie.

Afin d'éviter la saturation des étoiles brillantes de certains champs, les poses de chaque images furent morcellées en 2 ou 3 poses, selon la sensibilité des instruments et filtres utilisés. Les temps d'observations pour les poses photométriques étaient de 30, 25 et 20 minutes en *B*, *V*, et *R* resp. avec EFOSC, et de 25, 20 et 15 minutes en *B*, *V*, et *R* resp. avec EMMI, grâce à une sensibilité accrue. Les limites de complétudes atteintes sont 24.5, 24.0 et 23.5 en *B*, *V*, et *R*.

L'intervalle de seeing pour les observations d'imagerie effectuées avec EFOSC au 3.60 m est de 1.1–1.65 seconde d'arc. Le 3.60m a longtemps posé des problèmes de seeing médiocres, qui n'ont été résolus qu'ultérieurement (Faucherre 1995; Guisard 1996; Guisard et al. 1997). La taille des pixels sur EFOSC était à l'époque de $0.675''$, ce qui impliquait un sous-échantillonnage des images. Les meilleur seeing obtenu au NTT avec EMMI (valeur moyenne de $1.0''$), et les plus petits pixels de détecteurs (de $0.27''$ à $0.44''$, voir Table 2, Arnouts et al. 1997) ont conduit à un meilleur échantillonnage de la réponse impulsionnelle.

Les galaxies à observer en spectroscopie étaient sélectionnées préalablement à la mission, à partir des observations précédentes. Celle-ci permettaient d'effectuer la photométrie des galaxies détectées et de sélectionner celles qui étaient suffisamment brillantes pour appartenir à l'échantillon spectroscopique.

L'intérêt d'effectuer les relevés photométriques et spectroscopiques avec les mêmes instruments EFOSC et EMMI, était celui d'une grande souplesse, permettant une optimisation de l'utilisation du temps d'observation. Lorsque les nuits étaient de qualité photométrique, la priorité était donnée aux observations photométriques. Puis l'on passait à des observations spectroscopiques lorsque les nuits (ou les parties de nuit) n'étaient plus photométriques.

Le lourd travail de préparation des masques pendant tout l'après-midi précédent chaque nuit rendait les missions d'observation particulièrement fatigantes, et nécessitait 2 personnes par mission. Je fus présente à chaque mission, secondée dans les premiers temps par alternativement, A. Mazure, Y. Mellier, et G. Mathez. A partir de 1992, les 3 doctorants formés à l'IAP m'accompagnèrent à tour de rôle à chaque mission.

1.4.5 Choix des filtres et des magnitudes limites des catalogues

Le choix d’observer tous les champs du relevé dans les bandes B , V et R_c du système Johnson/Cousins repose sur le souhait d’avoir pour chaque galaxie 2 couleurs couvrant une large partie du domaine visible par des filtres adjacents. En l’occurrence, les filtres choisis couvrent l’intervalle 4000-8000Å, correspondant au domaine de longueur d’onde observé en spectroscopie. On verra plus loin que cela permet d’affiner la calibration en flux des spectres.

Le choix de la bande R_c pour la sélection des galaxies à observer en spectroscopie fut le résultat de 3 constatations : les relevés de galaxies existants (APM, CfA etc.) avaient été sélectionnés dans la bande B à partir de plaques photographiques, et la bande B se décale dans la bande R à un décalage vers le rouge de 0.6 ; les galaxies spirales sont en moyenne 1.5 magnitude plus brillantes dans la bande R que dans la bande B ; les CCD ont un bien meilleur rendement quantique dans la bande R que dans la bande B . Le choix de la bande R permettait ainsi d’effectuer l’imagerie préalable à la spectroscopie en un temps d’observation plus court qu’avec la bande B , cette dernière pouvant être obtenue pendant les missions ultérieures.

Le choix de la magnitude limite pour le catalogue spectroscopique $R_c = 20.5$ fut essentiellement déterminé par le temps de pose maximum qui pouvait être envisagé pour un relevé spectroscopique profond de galaxies faisable en environ 50 nuits de 3.6 m et NTT : 3h par champ de spectroscopie multi-objet, produisant les spectres simultanés d’environ 30 galaxies par champ. Cela permettait de viser l’acquisition d’un catalogue virtuellement complet d’environ 700 décalages spectraux. De surcroît, cette magnitude limite assurait la détection des galaxies spirales avec une magnitude absolue de $M^* \simeq -20$ au pic de la fonction de sélection du catalogue ($z \sim 0.3$). La magnitude $R_c = 20.5$ représentait par ailleurs un bon compromis entre l’efficacité d’EFOSSC et d’EMMI pour obtenir la spectroscopie d’un échantillon de plusieurs centaines de galaxies, et la nécessité d’une couverture angulaire suffisante pour échantillonner chaque feuillet de galaxies intercepté par la ligne de visée. On peut remarquer qu’incidemment, la limite $R_c = 20.5$ correspondait à la magnitude limite $B \simeq 22$ des catalogues basé sur les plaques photographiques comme l’APM.

1.4.6 Répartition temporelle et déroulement des observations

L’allocation initiale de temps d’observation fut de 60 nuits de 3.6 m et de NTT réparties en 2 missions par an (septembre et octobre) pendant 6 ans (1989-1994). Le contexte logistique des programmes-clé était très souple : à la fin de chaque année d’observation (tous les 2 semestres), on transmettait le nombre de nuits souhaité pour la prochaine année, en joignant un rapport sur les observations de l’année écoulée, et sur le traitement de ces données. La garantie de temps d’observation pendant chaque semestre s’est vérifiée être sans faille. Sur les 60 nuits, il y eut 12 nuits de mauvais temps, qui furent compensées par une attribution supplémentaire de 11 nuits en 1995.

Les premières missions du programme furent consacrées aux observations d’imagerie pendant chaque nuit photométrique. Pendant les nuits non photométriques, les observations de spectroscopie multi-objet furent effectuées. Celles-ci étaient préparées dans un premier temps à l’IAP par le traitement des images de la mission précédente, et la sélection des galaxies plus brillantes que la magnitude limite visée de $R_c = 20.5$. La fabrication des masques pour les observations de spectroscopie multi-fente se faisait pendant la mission, en prenant une image du champ à observer pendant la première nuit, à partir de laquelle les fentes pouvaient être positionnées avec précision sur les galaxies qui avaient été sélectionnées lors du traitement des images. L’image de préparation du champ devait être positionnée et orientée de manière à pouvoir observer le plus grand nombre de galaxies par champ tout en maintenant des largeurs de fentes suffisantes pour échantillonner suffisamment le fond de ciel de part et d’autre des galaxies, et ainsi effectuer des soustractions de ciel de qualité. Aucun logiciel n’existait à cette époque pour effectuer cette préparation des masques, et l’optimisation fut effectuée visuellement. Les fentes percées pour le relevé mesuraient 1.3-1.8 secondes d’arc de largeur et 10-15 minutes d’arc de longueur.

L’excellente complétude spectroscopique atteinte avec une couverture spatiale homogène (92% à $R_c \leq 20.5$) atteste du succès de la méthode. A noter que nous prenions en compte les galaxies déjà observées lors des missions précédentes, et ajoutions des galaxies avec $R_c > 20.5$ lorsqu’il restait de la place pour quelque

fentes supplémentaires sur un masque (souvent le cas pendant les dernières missions du programme). Cela permet d'obtenir la spectroscopie de 176, 77 et 18 galaxies supplémentaires avec dans les intervalles de magnitude $20.5 - 21$, $21 - 21.5$, et $21.5 - 22$ resp., conduisant à une complétude spectroscopique de 75% à $R_c \leq 21$ (voir Table 1, de l'article choisi n° 4, p. 109, de Lapparent et al. 2003).

Chapitre 2

Traitements et catalogues

Le programme-clé ESO-Sculpteur étant en quelque sorte “pionnier” par la combinaison d’image-rie CCD et de spectroscopie multi-fente, aucun logiciel n’existait à l’époque pour effectuer les traitements systématiques des images et spectres multi-objets. Emmanuel Bertin commença à cette époque à développer son logiciel “SExtractor” pour l’extraction de sources d’images astronomiques, dont le relevé ESO-Sculpteur a bénéficié comme banc d’essai.

Les autres outils performants d’AstrOmatic (<http://www.astromatic.net>; E. Bertin) destinés à la calibration astrométrique et l’homogénéisation photométrique, le compositage et la co-addition d’images, la mesure de la réponse impulsionnelle, virent le jour plus tard. Un logiciel complet pour le traitement des données de spectroscopie multi-objet fut également développé en vue de traiter les données de l’instrument VIMOS au VLT (“VIMOS Interactive Pipeline Graphical Interface”, ou VIPGI Scodeggio et al. 2005).

Par conséquent, le traitement de nos données photométriques et spectroscopiques du programme ESO-Sculpteur a nécessité l’écriture de nombreuses procédures automatiques dans le langage MIDAS, le logiciel de traitement des données d’observations développé par l’ESO, pour un total de 50 000 lignes de commandes (dont les 3/5 pour la spectroscopie multi-objet).

2.1 Collaborateurs

- Christèle Bellanger (alors doctorante IAP),
- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au TCFH, en détachement du LAM, Marseille),
- Sandro Bardelli (Obs. de Bologne, Italie),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l’Univ. Pontificia Católica, Chili),

Le traitement des données fut un lourd travail. Sur les conseils répétés de Harry Van der Laan, j’engageai la supervision de 3 doctorants à l’IAP, en 1992 (C. Bellanger), 1993 (S. Arnouts), et 1994 (G. Galaz). Ce renfort fut précieux et efficace. Les doctorant participèrent à la fois aux longues missions d’observation, et au traitement des images et spectres. S. Bardelli apporta une aide importante dans la phase la plus longue, celle de la mesure des décalage spectraux, au moyen des logiciels que nous avions mis au point à l’IAP. Nous avons aussi bénéficié d’une aide technique pendant une année (Christian Oberto, pour le traitement de la spectroscopie).

Si les observations furent terminées en 1995, le traitement de l’ensemble des observations spectroscopiques et des mesures de décalage vers le rouge, ainsi que la constitution des catalogues furent terminés en 1998, soit 9 ans après le début des observations.

2.2 Catalogue photométrique

Article: “The ESO-Sculptor faint galaxy redshift survey: The photometric sample”, Arnouts, S., **de Lapparent**, V., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., Bertin, E., Kruszewski, A., 1997, *A&A Suppl.* 124, pp. 163-182.

Thèse: “Etude photométrique multi-couleur d’un catalogue de galaxies lointaines”, Arnouts, S., 1996, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 7.

Le traitement des images CCD et la constitution d’un catalogue photométrique homogène ont fait l’objet d’une thèse d’Astrophysique à l’IAP par Stéphane Arnouts. Les différentes étapes des procédures de traitement des images écrites spécifiquement pour le programme dans l’environnement MIDAS par S. Arnouts et moi-même furent : (1) la soustraction du biais; (2) l’aplatissement des images au moyen d’un “super-flat” obtenu par filtre médian sur plusieurs images des champs; (3) la soustraction des sauts de flux causés par les rayons cosmiques; (4) la calibration photométrique au moyen de séquences stellaires obtenues en début, fin et milieu de nuit de photométrie; (5) la mesure des coordonnées astronomiques des objets.

La calibration photométrique visait à obtenir d’un part les coefficients de couleur, donnant le rapport entre les couleurs d’une séquence d’étoiles observées à travers le dispositif expérimental (téléscope, instrument, détecteur) complété par le filtre d’observation, et les couleurs de ces étoiles dans le filtre de référence que le filtre d’observation vise à approcher. La calibration photométrique fournit en outre le “point-zéro” du dispositif observationnel dans chaque filtre d’observation. La connaissance des coefficients de couleurs et des points zéro pour chaque filtre d’observation permet de transformer les flux mesurés des objets en magnitudes apparentes dans les filtres de référence.

Les coordonnées astronomiques des objets furent obtenues par alignement des images CCD sur les images provenant de la numérisation à la MAMA (Observatoire de Paris) du cliché photographique contenant la région du champ ESO-Sculpteur. Cet alignement produit les transformations MAMA-CCD, qui jointes aux transformations MAMA-J2000 fournies par le centre de numérisation, donna les transformation CCD-J2000. Ces procédures mises au point dans l’environnement MIDAS fournirent des coordonnées absolues avec une précision ≤ 0.5 arcsec.

Les observations de photométrie et de spectroscopie furent effectuées avec 2 instruments différents, EFOSC et EMMI, et pour ce dernier, 4 CCD différents furent utilisés (3 pour la voie rouge, et 1 pour la voie bleue), avec des tailles et échantillonnages différents. Les différents paramètres des CCD, et les point-zéro moyens dans les différentes bandes sont indiqués dans la Table 2 de Arnouts et al. 1997). Il était donc important de réajuster les point-zéros de chaque image CCD de la mosaïque. Ceci fut effectué par une méthode itérative visant à minimiser les différences de magnitudes dans les régions de recouvrement des 50 images (voir Arnouts et al. 1997, pour les détails). Ce réajustement fut fait de façon séparée pour les images du NTT et du 3.6m, afin de ne pas introduire un gradient entre les deux régions du ciel, pour lesquels des décalages systématiques des point-zéros avait été détectés dans les bandes *V* et *R*. Le réajustement fut de surcroît contraint par des observations supplémentaires de 4 à 5 champs dans chaque filtre, observés au NTT dans de très bonnes conditions de seeing ($0.8 - 1.0''$) et de photométrie lors d’une même nuit d’observation, et répartis tout le long de la bande du ciel que constitue le relevé. Ces champs furent utilisés comme référence absolue de la photométrie. Le processus d’ajustement des recouvrements permit de réduire l’écart-type entre les magnitudes d’objets communs dans les recouvrements de 0.11 mag en *B*, 0.13 mag en *V*, et 0.14 mag en *R* à 0.04 mag dans les 3 bandes.

La détection des objets, le calcul de leur magnitudes ainsi que la séparation étoiles-galaxies ont été effectués avec le logiciel d’analyse d’image SExtractor (Bertin & Arnouts 1996). Les magnitudes “MAG_BEST” ont été utilisées, une combinaison entre les magnitude d’ouverture et les magnitudes isophotales. Les données du programme ESO-Sculpteur ont contribué de façon significative à la mise à l’épreuve et à l’amélioration des performances de SExtractor pour la photométrie CCD de galaxies faibles, par une étroite collaboration entre Stéphane Arnouts et Emmanuel Bertin. Ce logiciel est maintenant largement utilisé par la communauté astronomique.

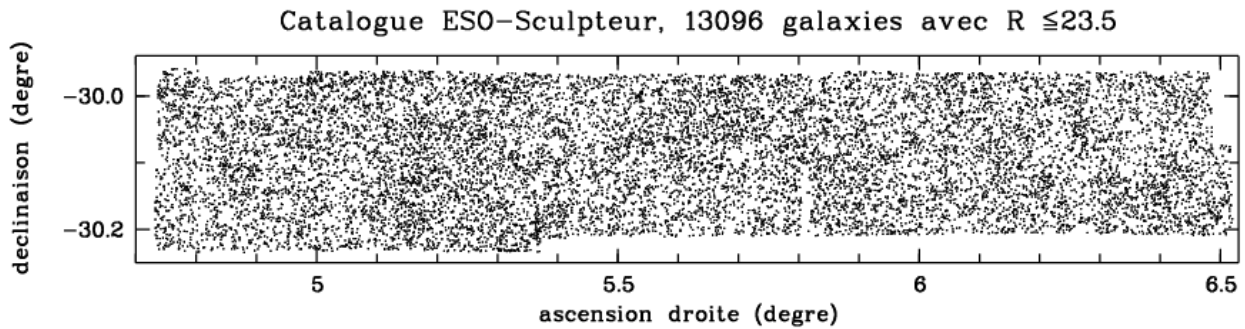


FIG. 2.1 – La répartition sur le ciel des galaxies du relevé ESO-Sculpteur, dans une région de 0.37 deg^2 du ciel austral [Arnouts et al. 1997].

Le catalogue ainsi obtenu est complet jusqu'à $R_c \simeq 23.5$, $V_j \simeq 24$ et $B_j \simeq 24.5$ dans une région de 0.37 deg^2 du ciel à proximité du pôle sud Galactique. Il fournit pour plus des $\sim 10\,000$ galaxies les magnitudes totales dans ces 3 filtres du système Johnson/Cousins et les coordonnées équatoriales (J2000) avec une précision de $0.2''$. La distribution des objets est montrée dans la Fig. 2.1. Les données photométriques produisent des distributions de comptages et de couleurs qui sont en bon accord avec les diverses données existantes (Arnouts 1996; Arnouts et al. 1997), et confirmèrent le “bleuissement” des galaxies à $R > 21$, visible également dans les distributions de couleur $B - V$ des galaxies à faible magnitude.

2.3 Catalogue spectroscopique

Article: “The ESO-Sculptor faint galaxy redshift survey: the spectroscopic sample”, Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., 1995, *A&A* 110, pp. 159-171

Thèse: “Un nouveau catalogue pour cartographier les grandes structures à $z \sim 0.5$ ”, Bellanger, C., 1995, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 6.

Le traitement des données de spectroscopie et de la mesure des décalage spectraux fit l'objet d'une thèse d'Astrophysique à l'IAP par Christhèle Bellanger. Avec son aide concernant la corrélation-croisée des spectres, je développai pendant de long mois dans l'environnement MIDAS des procédures semi-automatiques permettant le dépouillement de la spectroscopie multi-objet, qui permirent de traiter toutes les données de façon optimisée et homogène. Les spectres des galaxies les plus faibles ne représentant que quelques pourcents du fond de ciel, il était crucial d'optimiser chaque étape du traitement des spectres. Ces procédures ne requièrent que quelques rares interventions humaines, comme celle de la sélection des extrémités des fentes (cette approche est plus fiable que toute méthode automatique, et serait lourde à programmer pour prendre en compte tous les cas réels possibles, dont par exemple le recouvrement de fentes voisines sur quelques pixels).

La réduction des données des images de spectroscopie multi-objet est basée sur les étapes automatiques suivantes (sauf si indiqué autrement) :

- Le nettoyage des sauts de flux causés par les rayons cosmiques, qui peuvent mimer des raies d'émission s'il sont sur le spectre d'un objet; pour cela les poses sont toujours doublées (1h30 par pose), et le nettoyage se fait dans la majeure partie des cas de façon automatique par comparaison des deux poses.
- La correction de la variation de transmission des fentes, qui sont percées par une succession de trous pour EFOSC, et de mini-fentes pour EMMI; cette correction se fait par éclaircissement du masque par une lampe de spectre proche du ciel, et permet de réduire les variations de transmission de 4% à 1% avec EFOSC, et de 2.5% à 0.3% avec EMMI.

- L’extraction des fentes individuelles par intervention visuelle sur le profil moyen des spectres 2D le long des fentes.
- La calibration en longueur d’onde effectuée dans l’espace à 2 dimensions que constitue chaque fente individuelle.
- La soustraction du ciel par un ajustement à 2 dimensions prenant en compte les variations d’intensité du spectre du ciel le long de la fente en fonction de la longueur d’onde. La plage de ciel est choisie visuellement, afin d’éviter les biais par les voisins et les bords des fentes (le choix visuel est ici aussi la méthode la plus fiable).
- L’extraction des colonnes de spectre dans chaque objet pondérée par le profil de l’objet à travers chaque fente, afin de donner moins de poids aux spectres des ailes de l’objet qui souffrent d’un moins bon rapport signal-sur-bruit.

L’ensemble de cette procédure permet d’extraire facilement les spectres des ~ 10 galaxies par champ d’EFOSC, et ~ 30 par champ d’EMMI. Leur dispersion est de 230 \AA/mm , leur résolution varie de 20 \AA (EFOSC1) à 10 \AA (EMMI), et ils couvrent $4300\text{--}7000 \text{ \AA}$ avec EFOSC1 et $3500\text{--}9000 \text{ \AA}$ avec EMMI. Environ 100 spectres furent obtenus avec EFOSC1 au 3.6m, les 800 autres furent obtenus avec EMMI au NTT.

Pour chaque galaxie, l’intervalle de longueur d’onde dans le référentiel de la galaxie dépend de la combinaison de la dispersion du grisme, de la position de l’objet dans le masque multi-fente, et du décalage spectral de l’objet. La majorité des spectres EFOSC ont un intervalle dans le référentiel de la galaxie de $3300\text{--}4700 \text{ \AA}$ pour les spectres EMMI il est de $3300\text{--}5700 \text{ \AA}$. Par conséquent, peu de spectres incluent la raie d’émission $H\alpha$, à 6563 \AA , qui est utile pour déterminer l’extinction du spectre par le rapport avec la raie $H\beta$. En revanche, les raies H (3968.5 \AA) et K (3933.7 \AA) du Ca II et la bande G de la molécule CH (4304.4 \AA) sont détectées dans la plupart des spectres.

Le spectre de chaque galaxie est ensuite obtenu par soustraction du spectre du ciel correspondant, et par somme des 2 poses pondérée par le rapport signal-sur-bruit de chacun des 2 spectres. Les spectres résultants ont un rapport signal-sur-bruit moyen dans leur continu variant entre 10 et 50 pour les galaxies à $R_c \leq 20.5$, et entre 5 et 15 aux magnitudes plus faibles.

Les décalages spectraux sont mesurés d’une part par corrélation croisée avec un spectre du bulbe de M31, qui fournit un “point-zéro” précis et fiable pour l’échelle des décalages spectraux, ainsi qu’avec 6 spectres de référence décrivant les différents types spectraux E, S0, Sa, Sb, Sc, Irr (voir Bellanger et al. 1995 pour les détails). Ces corrélation croisées fournissent un signal basé sur les raies d’absorption.

Les raies d’émission sont d’autre part ajustées par des gaussiennes et produisent une autre mesure, le décalage spectral d’émission. Une fraction importante des galaxies (48%) présente des raies d’émission (Galaz & de Lapparent 1998), principalement [OII] 3727 \AA , $H\beta$ 4851 \AA , [OIII] 4958.9 \AA , et 5006 \AA , dont les largeurs équivalente sont mesurées après calibration en flux des spectres (voir Sect. 2.4).

Ces diverses mesures et leurs incertitudes sont comparées, et lorsqu’elles sont cohérentes, sont combinées et pondérées afin d’en déduire le décalage spectral final de chaque objet. Des tests extensifs de comparaison interne des mesures spectroscopiques multiples, ont fourni une évaluation détaillée de la qualité des données du relevé ESO-Sculpteur (de Lapparent et al. 2003). La précision des décalages spectraux est $\sigma_z = 0.00055$, soit 165 km/s ou 2.35 Mpc . Il est à noter que tous les spectres sont examinés visuellement au cours de toute la chaîne de traitement, et un indice de confiance inférieur à 100% est attribué lorsque qu’un ou plusieurs critères remettent en doute la fiabilité du décalage spectral.

La dernière étape fut celle de l’identification croisée du catalogue photométrique avec les galaxies observées en spectroscopie, pour lesquelles le logiciel utilisé au télescope ne fournissait pas de coordonnées. Ceci fut fait par repérage visuel des galaxies au sein des images correspondantes du relevé photométrique, à partir des cartes de champs imprimées au télescope lors de la fabrication des masques, produisant des listes de coordonnées $[x,y]$ approximatives. Celles-ci furent ensuite converties en coordonnées astronomiques et croisées avec le catalogue photométrique.

Le catalogue ainsi obtenu fournit les spectres et décalages spectraux de ~ 900 galaxies avec $R_c \leq 21.8$ (et $0.1 \leq z \leq 0.6$) dans 0.25 deg^2 du ciel. Les 613 galaxies à $R_c \leq 20.5$ constituent un catalogue spectroscopique complet à 92%. L’échantillon de 270 galaxies supplémentaires avec mesure de décalage spectral dans l’intervalle de magnitude $20.5 < R_c \leq 21.8$ conduit à une complétude spectroscopique de

14%, mais celle-ci augmente à 46% pour les 176 galaxies avec $R_c \leq 21$, soit une complétude cumulée de 76% à $R_c \leq 21$, et 52% à $R_c \leq 21.5$.

2.4 Calibration en flux, classification spectrale, et corrections-k

Article: “The ESO-Sculptor Survey: spectral classification of galaxies with $z \leq 0.5$ ”, Galaz, G., de Lapparent, V., 1998, *A&A* 332, pp. 459-478.

Thèse: “Classification spectrale et fonctions de luminosité des galaxies lointaines”, Galaz, G., 1997, *Thèse de Doctorat*, Univ. Paris 7.

La calibration en flux des spectres fut effectuée dans le cadre d’une troisième thèse à l’IAP, par Gaspar Galaz, un étudiant Chilien qui venait d’effectuer le DEA d’Astrophysique de Techniques Spatiales de l’Observatoire de Meudon.

Cette calibration basée sur l’observation en début, milieu et fin de nuit, de standards spectro-photométriques positionnés sur une grille pavant la région du champ disponible pour la spectroscopie. Les 2/3 des spectres ESO-Sculpteur furent obtenus dans des conditions météorologiques de qualité spectro-photométrique. Pour chaque spectre, nous avons ensuite mesuré les largeurs équivalentes des raies d’émission et d’absorption, qui fournissent des indicateurs complémentaires à la classification spectrale.

Nous avons effectué un test de la qualité de la calibration en flux en comparant les couleurs photométriques avec les couleurs “spectroscopiques”. Ces dernières sont obtenues en convoluant les spectres ESO-Sculpteur par les filtres standard B , V , et R_c , après calibration par des étoiles standards pour lesquelles photométrie et spectro-photométrie sont disponibles (Hamuy et al. 1992, 1994; Landolt 1992). Les couleurs “spectroscopiques” $V - R_c$ et $M_B - M_V$ sont calculées à partir des spectres présentant l’intervalle spectral correspondant. La comparaison avec les couleurs photométrique indique que les spectres ESO-Sculpteur ont un continuum trop rouge de 9% tous les 1000 Å dans l’intervalle $\sim 4000 - 8000$ Å. Nous interprétons ce résultat comme une sous-évaluation de la calibration spectro-photométrique dans la partie bleue des spectres, qui est affectée par une faible sensibilité des détecteurs. Une autre cause possible est la réfraction atmosphérique différentielle qui a tendance à séparer la partie bleue de la partie rouge des spectres. Les fentes étant alignées sur les images en R_c , la spectroscopie aura tendance à perdre la partie bleue des spectres.

La classification spectrale du catalogue est basée sur une décomposition en composantes principales (“Principal Component Analysis” ou PCA en anglais), prenant en compte les différents intervalles de longueur d’onde décrits par les spectres (Galaz 1997; Galaz & de Lapparent 1998; de Lapparent et al. 2003). Il avait déjà été montré que les couleurs des galaxies peuvent être décrites par une combinaison linéaires des couleurs stellaires (Aaronson 1978). La méthode PCA fournit une démonstration plus générale de cet effet sur un grand échantillon de spectres et à plus grand décalage vers le rouge. Elle permet d’écrire chaque spectre comme une combinaison linéaire de 3 composantes qui reproduisent 98% du flux des galaxies : les 2 premières composantes déterminent la proportion des différentes populations stellaires présentes dans chaque galaxie, alors que la 3ème composante détermine la contribution des raies nébulaires. Cela fournit une classification continue dans un espace à 2 paramètres, indépendante de tout spectre de référence. Les deux paramètres de classification sont de surcroît corrélés, les galaxies de type tardif ayant des raies d’émission plus fortes. Cette classification présente l’avantage d’être faiblement dépendante du niveau de bruit des spectres. Elle est de surcroît étroitement liée à la classification morphologique (Connolly et al. 1995; Sodre & Cuevas 1997). En projetant les spectres de référence de Kennicutt (1992) sur la séquence PCA, nous constatons que la séquence de Hubble s’organise de façon monotone dans le sens d’un accroissement de la contribution des jeunes populations stellaires et des raies nébulaires pour les types plus tardifs. Par ailleurs, nous estimons que les fractions de galaxies ESO-Sculpteur ayant des spectres similaires aux spectres de référence pour les types morphologiques E, S0, Sa, Sb, Sc, et Sm/Im sont : 17%, 9%, 15%, 32%, 24%, et 3% (Galaz & de Lapparent 1998).

La connaissance des types spectraux des galaxies permet le calcul des corrections-k, donnant la transformation des magnitudes apparentes observées en magnitudes absolues. Les correction-k sont fonction

de la répartition spectrale de chaque galaxie, et de son décalage spectral. Ces calculs, qui nécessitent la connaissance de la partie UV non-observée des spectres, sont basés sur les spectres de bibliothèques de synthèse spectrale (Fioc & Rocca-Volmerange 1997; Bruzual & Charlot 1993). Nous avons développé une méthode originale selon laquelle les spectres observés sont comparé aux spectres synthétiques au moyen de la classification spectrale PCA. La précision des magnitudes absolues qui en résultent en BVR_c est de 0.1 à 0.2 mag (Galaz & de Lapparent 1998; de Lapparent et al. 2003). Une évaluation détaillée de la qualité des données photométriques, de la classification spectrale, des corrections K, et de la calibration en flux de la spectroscopie du relevé ESO-Sculpteur est produite dans de Lapparent et al. (2003, article choisi n° 3, p. 67).

2.5 Article choisi n° 1

“The ESO-Sculptor Survey: spectral classification of galaxies with $z \leq 0.5$ ”

Galaz, G., **de Lapparent**, V.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 332, pp. 459-478

1998

Chapitre 3

Structuration à grande échelle

3.1 Introduction

Les cartes du “Center for Astrophysics Redshift Survey”, complètes jusqu’à $m_{B(0)} = 15.5$ et couvrant une fraction importante de l’hémisphère nord, avaient suggéré une nouvelle image de la distribution des galaxies à grande échelle : de grandes régions vides de galaxies de diamètre compris entre 15 et 70 Mpc, et délimitées par de minces feuillets de quelques megaparsecs d’épaisseur (de Lapparent et al. 1986a), comme montré dans le diagramme central de la Fig. 3.1. Des mesures de la dimensionnalité des structures basées sur la variation des comptages dans des cellules de taille variable (de Lapparent et al. 1991) avaient indiqué un accord avec un réseau de structures à 2 dimensions. Dans cette distribution cellulaire, des structures cohérentes sur des échelles comparables à la taille des cartes peuvent apparaître sous la forme de grands murs (Geller & Huchra 1989; voir aussi Stoughton et al. 2002).

Les résultats du “Center for Astrophysics Redshift Survey” causèrent un regain d’intérêt pour la cartographie des grandes structures de l’Univers, qui conduisit à l’acquisition de nouveaux catalogues sondant la distribution des galaxies à plus grand décalage vers le rouge ($z \sim 0.1$, soit ~ 400 Mpc). Malgré leur échantillonnage partiel (ou incomplétude), les premiers de ces catalogues confirmèrent la structuration en vides et feuillets de la distribution, avec une taille de vides dans l’intervalle 30-150 Mpc (Shectman et al. 1996; Vettolani et al. 1997; Schuecker & Ott 1991). Ce n’est qu’avec la mise en place des grands relevés 2dF et SDSS, visant à obtenir la spectroscopie à fibre pour des centaines de milliers de galaxies jusqu’à une magnitude apparente $r \sim 17.8$ que l’on pu disposer de grand échantillons statistiques (Stoughton et al. 2002; Colless et al. 2003b). Les cartes tri-dimensionnelles de la distribution des galaxies obtenues par ces deux relevés (voir Fig. 3.1) montrèrent que l’alternance de vides et minces feuillets de galaxies est omniprésente dans les nouvelles régions explorées à $z \lesssim 0.2$, et permirent de caractériser mathématiquement la nature des grandes structures.

La nature cellulaire de la distribution peut être décrite par une topologie en éponge (Vogeley et al. 1994), celle-ci découlant naturellement d’un spectre de fluctuations primordiales de matière dont les amplitudes suivent une loi de répartition gaussienne Hamilton et al. (1986); Weinberg et al. (1987). L’intérêt des mesures de topologie réside dans la contrainte qu’elles posent sur les moments d’ordre élevé de la distribution; elles fournissent ainsi un test des simulations numériques qui sont ajustées pour avoir le même spectre de puissance que les observations. La topologie de la distribution des galaxies a été mesurée par le “genus”, en construisant la surface d’iso-densité à une densité de seuil donnée, puis en mesurant la différence entre le nombre de trous (de type “beignet”) et le nombre de régions isolées observés dans cette surface. Le genus est aussi l’intégrale de la courbure Gaussienne le long de la surface d’iso-densité (Gott et al. 1986, 1987).

Dans la topologie en éponge qui résulte de fluctuations gaussiennes, les variations du genus en fonction de la densité sont symétriques aux hautes et basses densités, ce qui signifie que les surfaces d’iso-densité séparant les régions de haute et faible densité ont les mêmes propriétés topologiques. En particulier, à la densité intermédiaire séparant le relevé en deux volumes égaux, les régions de haute et basse densité

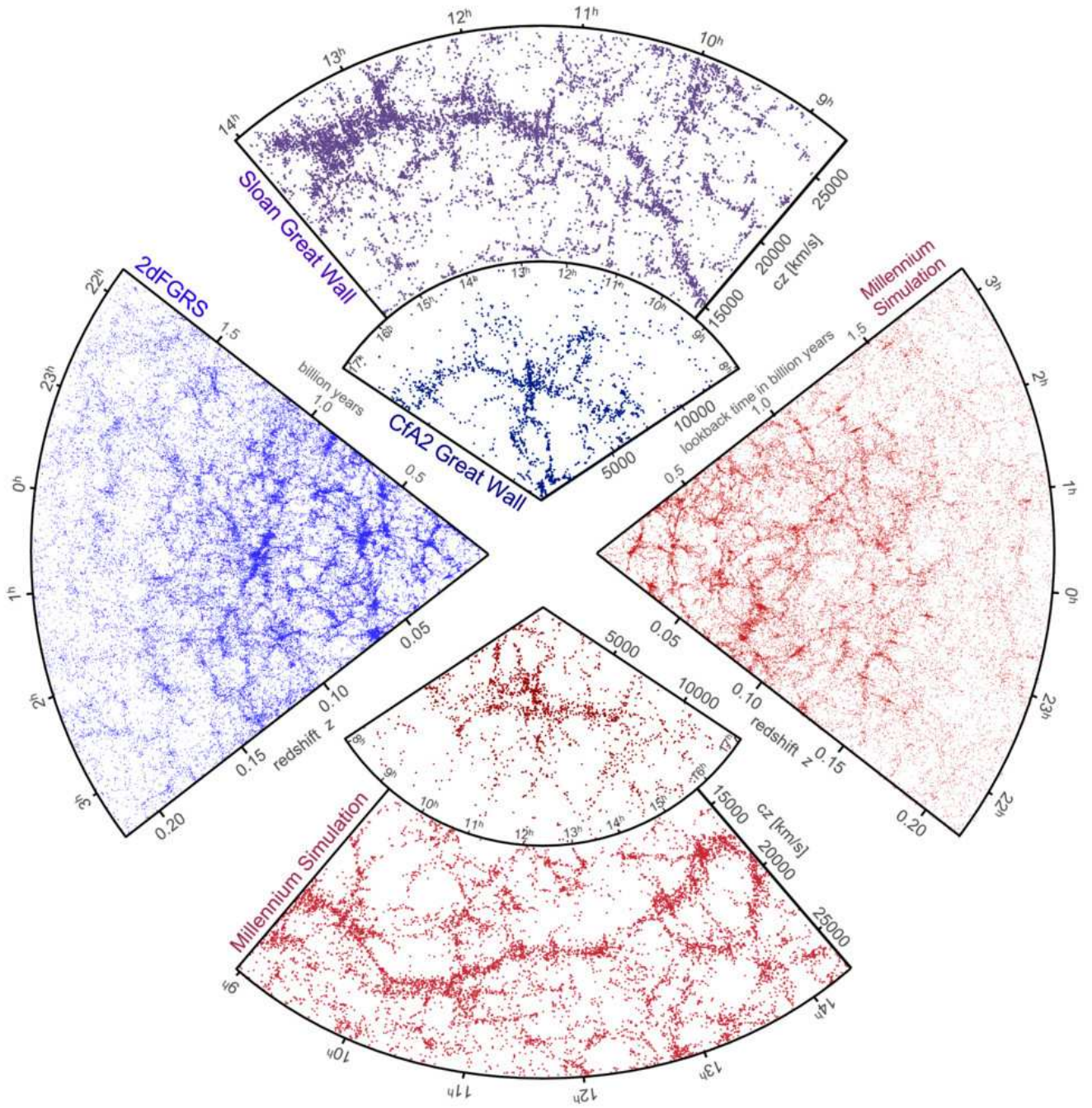


FIG. 3.1 – Une synthèse des observations et simulations numériques concernant la répartition des galaxies à grande échelle (image provenant du “Millennium Simulation Project”, Max-Planck-Institut für Astrophysik).

forment deux structures continues imbriquées l’une dans l’autre et contenant de nombreux trous mais aucune région isolée; on peut donc aller de tout endroit d’un des deux volumes à un autre sans traverser la surface d’iso-densité. Lorsque l’on isole les régions de haute et faible densité, les volumes se morcellent en faveur de régions isolées, et le genre devient négatif, avec un comportement similaire vers les hautes et les basses densités.

Les mesures du genre appliquées au relevé SDSS permettent de comparer avec une excellente statistique l’Univers observé aux résultats des simulations numériques avec matière noire et constante cosmologique (Springel et al. 2005). Les variations du genre pour le relevé SDSS sont proches de celles attendues pour des fluctuations Gaussiennes (Gott et al. 2009), qui sont elles-mêmes en bon accord avec celles mesurées pour les simulations numériques de matière noire (Springel et al. 2005; Park et al. 2005b). Des déviations par rapport à une topologie en éponge sont cependant mesurées dans le relevé SDSS sous la forme d’une légère prééminence des structures connexes de type amas (Gott et al. 2008). Cette déviation pourrait être entièrement due aux galaxies brillantes, alors que la topologie de la distribution des galaxies peu lumineuses montrent plutôt une prééminence des vides, soit une topologie de type “bulles” (Park et al. 2005a). Des différences dans la topologie en fonction de la luminosité, la couleur et la morphologie des galaxies posent en outre des contraintes sur les scénarios semi-analytiques de formation des galaxies Choi et al. (2010). Enfin, les mesures de “squelette” offrent une approche intéressante pour caractériser le réseau de filaments et faire le lien avec la théorie (Pogosyan et al. 2009; Sousbie et al. 2009), mais l’application aux données observationnelles n’a pas encore été suffisamment explorée (Sousbie et al. 2008).

3.2 Un pinceau à travers la toile cosmique

Article: “Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”, Bellanger, C., **de Lapparent**, V., 1995, *ApJ Letters* 445, pp. L103-L107

Les résultats du catalogue ESO-Sculpteur ont permis de lever par l’observation l’ambiguïté posée par un sondage voisin dans le ciel (Broadhurst et al. 1990), qui suggèrait une répartition périodique des galaxies le long de la ligne-de-visée, avec une période de $128 h^{-1} \text{ Mpc}$ (si l’on utilise une constante de Hubble $H_0 = 100 h \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Ces résultats furent mis en défaut par diverses analyses statistiques montrant que le regroupement des galaxies aux échelles inférieures à $5 h^{-1} \text{ Mpc}$, qui se matérialise par la présence de groupes de galaxies dans les filaments et d’amas aux intersections de ceux-ci, peut générer des périodicités telles que celles observées par Broadhurst et al. (1990), avec une probabilité de quelques pourcents à une dizaine de pourcents dans un Univers n’ayant pas de fluctuations primordiales à très grande échelle (Kaiser & Peacock 1991; Weiss & Buchert 1993). En outre, Park & Gott (1991) montrèrent qu’il n’y avait pas de différence statistique dans la mesure de périodicité entre les observations de Broadhurst et al. (1990) et des pinceaux étroits de même géométrie extraits de simulation numériques avec matière noire froide.

Les pinceaux de (Broadhurst et al. 1990) sont par ailleurs trop étroits pour détecter tous les filaments interceptés (ils échantillonnent transversalement moins de $5 h^{-1} \text{ Mpc}$ des filaments interceptés, soit la longueur de corrélation des galaxies), et des simulations de pinceaux étroits montrèrent que la taille typiques des vides observés dans le relevé du CfA ($\lesssim 60 h^{-1} \text{ Mpc}$) est compatible avec la détection de pics marqués tous les $120 h^{-1} \text{ Mpc}$ (de Lapparent et al. 1991).

En revanche, par sa couverture angulaire continue, et par son taux de complétude élevé, le relevé ESO-Sculpteur permet une cartographie détaillée de la distribution des galaxies à grande distance : $0.1 \leq z \leq 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995). La Fig. 3.2 montre qu’il apparaît dans le relevé ESO-Sculpteur la même remarquable alternance de vides et filaments que celle détectée dans les catalogues de l’Univers proche, ce qui fut la première indication que cette structuration à grande échelle persiste à $z \sim 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995). De surcroît, le diamètre typique des vides à grande distance est de 20–40 Mpc (avec $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$), en bon accord avec les structures proches. Ces résultats furent ensuite confirmés par des sondages analogues à une profondeur similaire (Small et al. 1999; Yee et al. 2000).

On remarque que l’échelle de $128 h^{-1} \text{ Mpc}$ (ou 183 Mpc avec $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$), correspondant à un intervalle en décalage spectral de 0.045, est largement échantillonnée par le catalogue ESO-Sculpteur

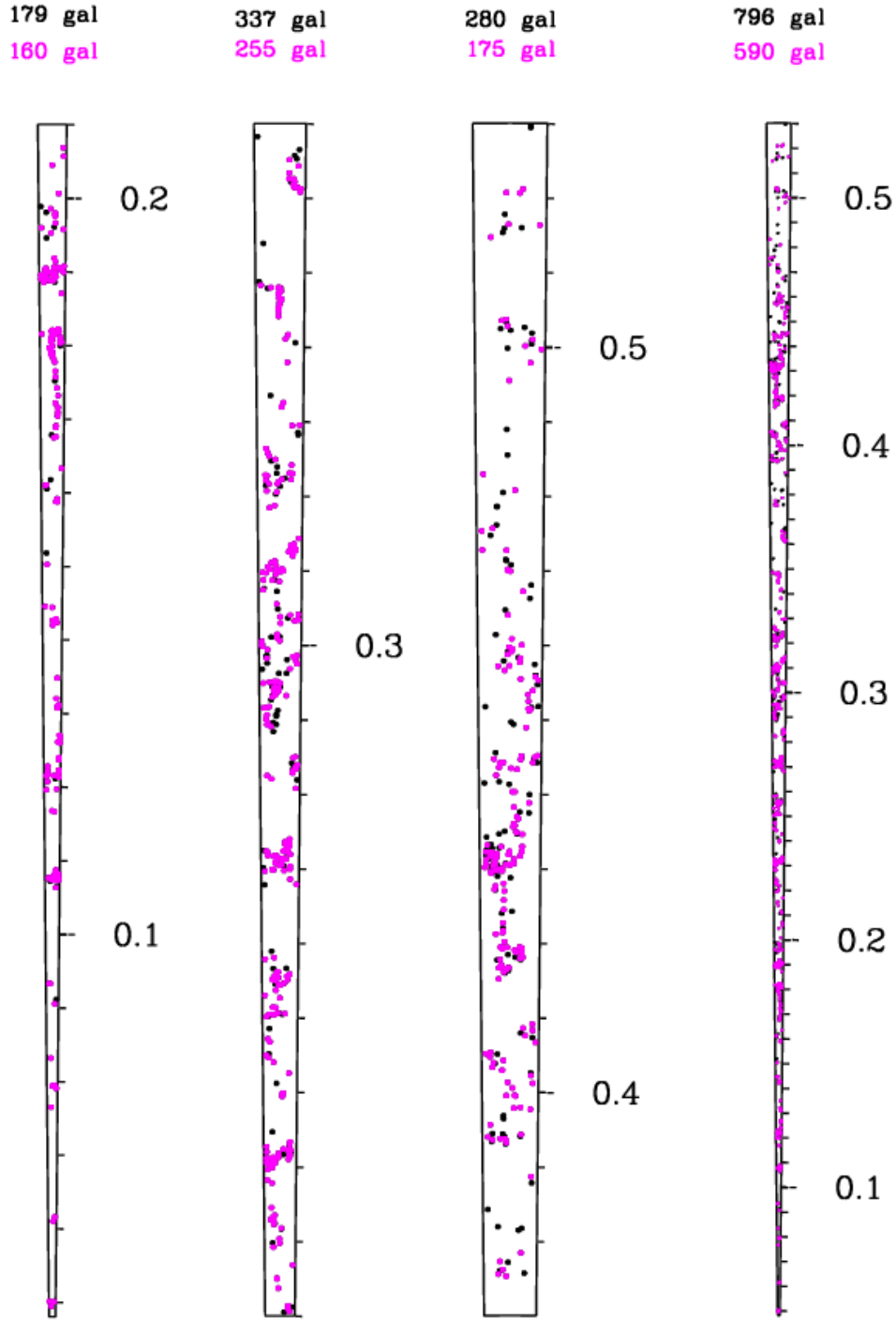


FIG. 3.2 – La distribution spatiale du catalogue spectroscopique du relevé ESO-Sculpteur, dans une région de 0.25 deg^2 du ciel austral. Le cône de droite montre la ligne de visée complète du sondage. Les 3 cônes de gauche permettent une vision rapprochée des structures dans 3 intervalles de décalage spectral adjacents ($0.08\text{--}0.21$, $0.21\text{--}0.34$, $0.34\text{--}0.47$). les galaxies en magenta ont $R_c \leq 20.5$, celles en noir ont $20.5 < R_c \leq 21.5$ (les nombres de galaxies indiqués en noir correspondent cependant à tous les objets avec $R_c \leq 21.5$). La nature cellulaire de la distribution des galaxies à grande échelle se prolonge à grande distance, sous forme d'une alternance de vides et feuillets espacés de $\sim 25 - 40 \text{ Mpc}$.

(sondant une région de $\sim 2800 h^{-1}$ Mpc ou ~ 2000 Mpc avec $H_0 = 70$ km/s/Mpc) et qu'il n'apparaît pas de structuration marquée à cette échelle particulière. Le relevé ESO-Sculpteur confirme ainsi que les structures détectées par Broadhurst et al. (1990) sont causées par l'association perverse d'une faible couverture angulaire et des fluctuations inhérentes au regroupement des galaxies aux petites échelles. La Fig. 3.2 montre qu'en accord avec le mode de sélection du champ (Sect. 1.4.1), le relevé ESO-Sculpteur ne contient pas d'amas riche de galaxies, mais de nombreux groupes, constitués de galaxies précoces et tardives.

3.3 Article choisi n° 2

“Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”

Bellanger, C., **de Lapparent**, V.

Astrophysical Journal Letters, Vol. 445, pp. L103-L107

1995

3.4 Fonctions de corrélation par type

Article: “Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1-0.5”, 2007, **de Lapparent**, V., Slezak, E., *A&A* 472, pp. 29-49.

Nous avons obtenu la première détection et mesure du regroupement plus serré d’un facteur 2 des galaxies rouges par rapport aux galaxies bleues à partir d’un catalogue profond de 20 000 galaxies à $V < 23.5$ (Cabanac et al. 2000), observé avec la caméra UH8K au TCFH (précurseur de MEGACAM). Le relevé ESO-Sculpteur permet d’aller plus loin dans la distinction du regroupement entre les divers types de galaxies. Pour cette analyse, on utilisait les 870 galaxies du relevé avec $R_c \leq 21.5$, complet à 52% jusqu’à cette limite, résultant d’une complétude de 92% à $R_c \leq 20.5$ et de 25% pour $20.5 \leq R_c \leq 21.5$.

Par son taux de complétude élevé en décalage vers le rouge, et par sa couverture angulaire continue, le relevé ESO-Sculpteur permet une mesure quantitative du regroupement à grande échelle, au moyen des fonctions de corrélation spatiales à 2-points. Afin de détecter des effets de ségrégation liés à la nature des galaxies, nous mesurâmes les fonctions de corrélation pour les différents types de galaxies mis en évidence par les fonctions de luminosité (Sect. 2.4.1). Le résultat principal est montré dans la Fig. 3.3. À petite échelle ($\leq 0.3 h^{-1}$ Mpc), le signal est dominé par les galaxies géantes de type spectral précoce (E, S0, Sa), puis par les galaxies naines (dE, dI), alors que les galaxies spirales tardives (Sb, Sc, Sd/Sm) montrent une bien plus faible corrélation spatiale. Aux échelles de ~ 0.5 à $10 h^{-1}$ Mpc, les galaxies géantes précoces et les spirales tardives ont la même fonction de corrélation, alors qu’il n’y a pas de corrélation significative des galaxies naines à ces échelles (de Lapparent & Slezak 2007).

Nous avons aussi calculé les fonctions de corrélation croisées entre les divers types de galaxies, et celles-ci indiquent que les galaxies géantes de type précoce ont tendance à se placer au centre des halos les plus massifs, alors que les galaxies spirales tardives occupent plutôt la périphérie de ces halos, ou le centre des halos moins massifs. En outre, les galaxies naines sont peu mélangées avec les galaxies spirales tardives, et sont préférentiellement localisées comme satellites des galaxies géantes de type précoce (de Lapparent & Slezak 2007). Certains de ces effets sont visibles à l’œil dans les diagrammes en cône de la Fig. 5 de l’article choisi n° 3, p. ci-après : on voit par exemple que les galaxies précoces sont plutôt dans les régions centrales des groupes.

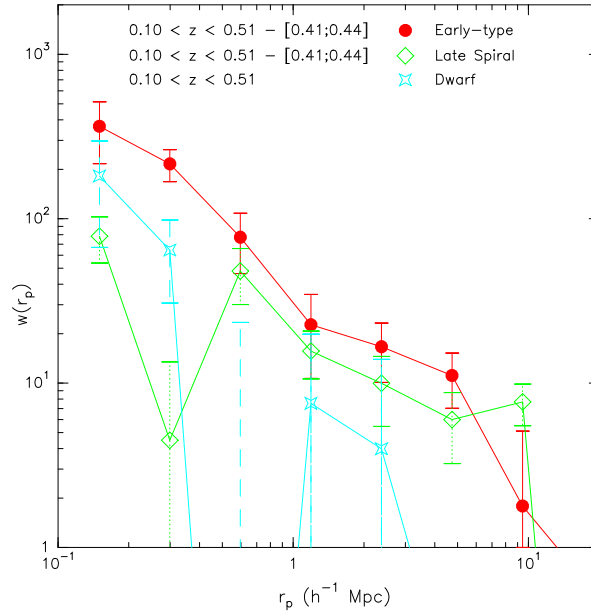


FIG. 3.3 – Les fonctions de corrélation du relevé ESO-Sculpteur pour les galaxies géantes, de type précoce (E, S0, Sa), et de type spirales tardives (Sb, Sc, Sd/Sm), et les galaxies naines (dE, dI).

Un autre résultat intéressant est que ces diverses fonctions de corrélation révélèrent un comportement

bimodal analogue à celui attendu dans les modèles contemporains de formation hiérarchique des galaxies au sein des halos de matière noire (Jenkins et al. 2001; Berlind & Weinberg 2002; Berlind et al. 2003) : à petite échelle, la fonction de corrélation est dominée par la composante intra-halo, provenant des paires de galaxies résidant dans un même halo de matière noire ; à grande échelle, c’est la composante inter-halo, correspondant aux paires de galaxies appartenant à des halos différents, qui domine ; cette dernière reproduit ainsi la fonction de corrélation de la matière. La transition entre les 2 régimes est observée à $\sim 1 h^{-1}$ Mpc dans le relevé ESO-Sculpteur (voir la courbe des types précoces “early-type” dans la Fig. 3.3). Dans les modèles, cette transition s’opère à une échelle comparable au diamètre du viriel des grands halos, et les caractéristiques de la transition (force et échelle) dépendent de la fraction relative de galaxies dans les halos de faible et grande masse. Dans ce contexte, le relevé ESO-Sculpteur indiqua que les galaxies géantes de type précoce ont tendance à se placer au centre des halos les plus massifs, alors que les galaxies spirales tardives occupent plutôt la périphérie de ces halos, ou le centre des halos moins massifs.

Ce comportement bimodal fut détecté dans les diverses fonctions de corrélation du SDSS sondant la distribution des galaxies à $z \leq 0.1$ (Zehavi et al. 2004, 2005a,b). Notre analyse du catalogue ESO-Sculpteur montra que ce comportement est aussi détecté à plus grand décalage spectral ($z \leq 0.5$), avec des différences spécifiques aux différents types de galaxies. La modélisation de ces résultats devrait fournir des contraintes sur la répartition des multiples types d’objets au sein des halos de matière noire. Sachant que chaque type de galaxie correspond à une histoire spécifique d’accumulation de la masse et de la transformation en étoiles, ces mesures de fonction de corrélation représentent des outils prometteurs pour clarifier notre compréhension des mécanismes de formation des galaxies.

3.5 Article choisi n° 3

“Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1-0.5”

de Lapparent, V., Slezak, E.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 472, pp. 29-49

2007

3.6 Fluctuations à très grande échelle

Des fluctuations de densité à l'échelle de $\sim 150\text{--}200$ Mpc sont présentes dans le relevé ESO-Sculpteur. La Fig. 3.4 montre que les régions situées dans l'intervalle $0.33 < z < 0.39$ (soit ~ 213 Mpc en intervalle de distance comobile) et dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$ (~ 170 Mpc) sont sous-denses et sur-denses resp. par rapport au nombre de galaxies attendues dans un échantillon qui serait spatialement homogène, pour toutes les combinaisons de types géantes. Les galaxies naines (dE+Im) sont intrinsèquement trop peu lumineuses pour être détectées dans le relevé à $z \gtrsim 0.4$; on remarque cependant bien la chute brutale de densité à $z \simeq 0.3$. Ces fluctuations sont bien visible dans le diagramme en cône complet de la Fig. 3.2, et apparaissent comme une alternance d'un creux puis d'un excès. Ces deux fluctuations de densité étaient déjà visibles dans les diagrammes en cône basé sur l'échantillon spectroscopique incomplet à 50% (Bellanger & de Lapparent 1995, voir Fig. 1). Ces structures produisent un signal alternativement positif et négatif dans les fonctions de corrélation entre 50 et 200 Mpc, et un excès de corrélation aux échelles entre 5 et 20 Mpc (voir Figs. 4, 7 et 9 de l'article choisi n° 3, p. 69, de Lapparent & Slezak 2007).

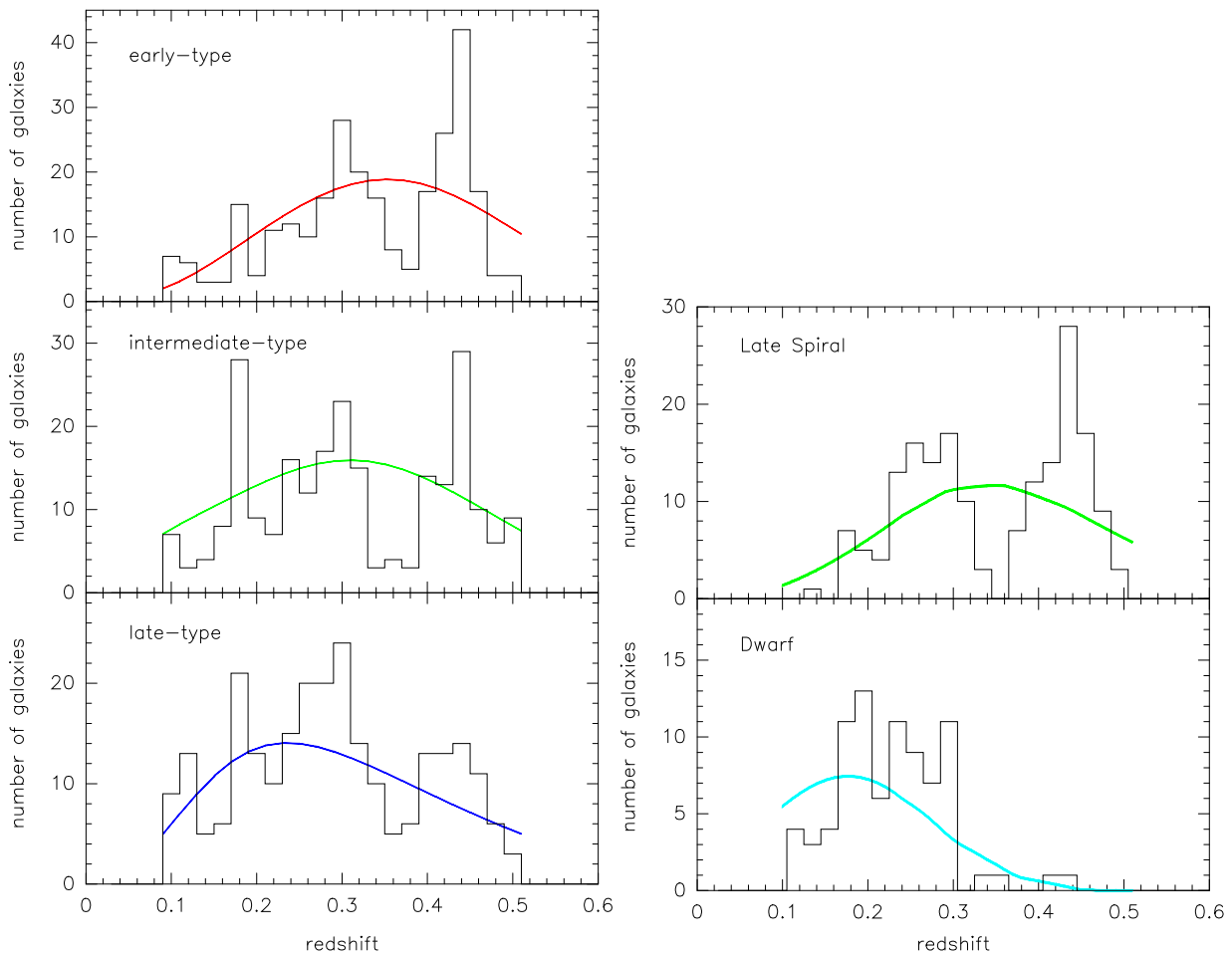


FIG. 3.4 – *A gauche, les histogrammes en décalage spectral des galaxies de type spectral précoce $E+S0+Sa$, (haut), intermédiaire $Sb+Sc$ (centre), and tardif $Sc+Sd/Sm$ (bas) du relevé ESO-Sculpteur. Les courbes continues indiquent les distributions attendues pour des échantillons de même combinaison de types et avec les fonctions de luminosité que dans le relevé observées, mais répartis spatialement de façon homogène. A droite, on montre la distribution des galaxies de type spectral $Sb+Sc+Sd/Sm$, et la distribution des galaxies naines $Im+dE$.*

J'évalue ici le niveau de vraisemblance de ces fluctuations, en prenant en compte l'excès de variance

prédit par les fonctions de corrélation mesurées par de Lapparent & Slezak (2007, voir Sect. précédente). Pour estimer le nombre de galaxies prédites pour un échantillon homogène, je prends en compte les types spectraux des différentes galaxies, et les corrections-K et fonctions de luminosité correspondantes. Les nombres de galaxies observés N_{obs} et prédits N_{pred} , ainsi que l’excès ou le défaut de densité N_{obs}/N_{pred} sont indiqués pour les 2 régions considérées dans la Table 3.6. On indique aussi les valeurs correspondantes pour l’ensemble des galaxies de tous types dans chaque région.

La colonne N_{obs}/N_{pr} de la Table 3.6 montre que pour les types spectraux précoces (E+S0+Sa) et tardifs (Sc+Sd/Sm+Im), ainsi que pour tous les types réunis, les 2 régions $0.33 < z < 0.39$ et $0.41 < z < 0.46$ sont sous-dense et sur-dense resp. d’un facteur ~ 2 . Pour les galaxies de type spectral intermédiaire (Sb+Sc+dE), N_{obs}/N_{pr} diminue à $\sim 1/4$ dans la région de la sous-densité.

La Table 3.6 indique aussi le contraste de densité $\Delta N/N_{pr} = (N_{obs} - N_{pr})/N_{pr}$ de chaque structure pour les différents regroupements de types de galaxies, avec un contraste nul attendu pour une distribution homogène. Nous estimons le niveau de significativité des contrastes mesurés. La variance du contraste est la somme des variances relatives sur N_{pr} et N_{obs} . La première variance est le terme de Poisson $1/N_{pr}$. Dans le formalisme de la fonction spatiale de corrélation, la seconde variance est la somme du terme de Poisson $1/N_{pr}$ et de la double intégrale en volume (normalisée) de la fonction de corrélation, soit :

$$\sigma^2 \left(\frac{\Delta N}{N_{pr}} \right) = \frac{2}{N_{pr}} + \frac{1}{V^2(z_{min}, z_{max})} \int_{V(z_{min})}^{V(z_{max})} \xi(r_p, \pi) dV_1 dV_2, \quad (3.1)$$

où $V(z_{min}, z_{max})$ est le volume comobile intercepté par le relevé entre z_{min} et z_{max} , et r_p et π les séparations projetées et le long de la ligne de visée des galaxies. L’utilisation de $\xi(r_p, \pi)$ conduit à une estimation non biaisée par les distortions en décalage vers le rouge dues aux vitesses propres des objets. L’intégrale est calculée en utilisant la fonction de corrélation effectivement mesurée par de Lapparent & Slezak (2007) pour l’ensemble du relevé. Les valeurs des 2 termes de variance intervenant dans l’Eq. 3.1 pour les différents types sont indiqués dans la Table 3.6, ainsi que la valeur correspondante de l’écart-type $\sigma(\Delta N/N_{pr})$, et le niveau de significativité $\Delta N/N_{pr}/\sigma(\Delta N/N_{pr})$.

On constate que la variance due au regroupement des galaxies est supérieure au terme de Poisson d’un facteur 3. Si les niveaux de significativité ne sont que de 1.5 à 2.0 σ pour la sous-densité, ils sont $\geq 2.5 \sigma$ pour la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$, que l’on considère l’ensemble des galaxies ou uniquement les galaxies de type précoce.

On peut aussi effectuer le calcul du terme de variance causé par le regroupement des galaxies en utilisant la fonction de corrélation obtenue sans la sur-densité. En effet, cette structure introduit un excès de corrélation marqué dans $\xi(s)$ aux échelles > 2 Mpc, et entre 3 et 10 Mpc dans $\omega(r_p)$, la fonction de corrélation projetée; cette dernière se retrouve déformée par rapport à la loi de puissance qu’elle décrit habituellement à ces échelles de Lapparent & Slezak (2007). On peut en déduire que le relevé ESO-Sculpteur n’est pas un échantillon représentatif de la distribution des galaxies, et que cette structure accroît artificiellement l’amplitude du regroupement des galaxies à ces échelles. En faisant l’hypothèse que la fonction de corrélation spatiale mesurée dans le relevé ESO-Sculpteur sans la structure sur-dense à $0.41 < z < 0.46$ est plus proche de la fonction de corrélation “universelle” des galaxies, alors on peut réévaluer les niveaux de significativité dans la Table 3.6. Celles-ci apparaissent dans la colonne de variance due au regroupement avec l’indication “SSD” (pour “sans sur-densité”).

Pour tester la méthode, on a effectué les mêmes calculs pour la région sur-dense à $0.27 < z < 0.33$, qui précède (en z) la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$, ainsi que pour 2 régions plus petites à $0.17 < z < 0.20$ et $0.25 < z < 0.26$, localisées sur des groupes de galaxies, et causant pour première un pic marqué dans les histogrammes de la Fig. 3.4 (y compris dans celui des galaxies naines). Les résultats figurent également dans la Table 3.6. Les densités relatives de ces régions sont typiquement de $\simeq 1.5$, et les niveaux de significativité sont $\simeq 0.6 - 1.1 \sigma$ (selon la fonction de corrélation utilisée), sauf pour la région à $0.17 < z < 0.20$ avec $1.2 - 1.7 \sigma$ pour tous les types réunis, et $2.1 - 2.7 \sigma$ pour les galaxies de type intermédiaire (on remarque un pic très marqué dans la Fig. 3.4). Ces tests montrent que l’excès de variance dû à la fonction de corrélation suffit à décrire ces sur-densités de tailles diverses.

Avec un niveau de significativité de 2.59σ ou 3.33σ (selon la fonction de corrélation utilisée), la région sur-dense à $0.41 < z < 0.46$ est une fluctuation de densité assez rare, avec une probabilité de

TAB. 3.1 – *Contraste et niveau de significativité des fluctuations de densité dans le relevé ESO-Sculpteur*

Intervalle Volume (Mpc ³)	Type	$\frac{N_{obs}}{N_{pr}}$		$\frac{\Delta N}{N_{pr}}$	$\frac{2}{N_{pr}}$	$\frac{\int \xi}{V^2}$	σ	Sig.	$\frac{\int \xi}{V^2}$ SSD	σ	Sig.
0.41-0.46	E+S0+Sa	81 34.8	= 2.33	1.33	0.0575	0.1552	0.46	2.88	0.0836	0.38	3.54
170 Mpc	Sb+Sc+dE	49 24.9	= 1.98	0.98	0.0802	0.1552	0.49	2.04	0.0836	0.40	2.44
35705	Sc+Sm+Im	38 21.1	= 1.83	0.83	0.0949	0.1552	0.50	1.69	0.0836	0.42	2.00
	Tout	168 80.8	= 2.09	1.09	0.0247	0.1552	0.42	2.59	0.0836	0.33	3.33
0.33-0.39	E+S0+Sa	29 50.2	= 0.58	-0.42	0.0398	0.1168	0.40	-1.09	0.0534	0.31	-1.41
213 Mpc	Sb+Sc+dE	10 39.1	= 0.26	-0.74	0.0511	0.1168	0.41	-1.81	0.0534	0.32	-2.29
31896	Sc+Sm+Im	21 36.8	= 0.57	-0.43	0.0543	0.1168	0.41	-1.06	0.0534	0.33	-1.34
	Tout	60 126.2	= 0.47	-0.53	0.0159	0.1168	0.36	-1.46	0.0534	0.26	-2.01
0.27-0.33	E+S0+Sa	64 48.2	= 1.33	0.33	0.0415	0.1077	0.39	0.85	0.0455	0.29	1.11
220 Mpc	Sb+Sc+dE	55 41.3	= 1.33	0.33	0.0484	0.1077	0.40	0.81	0.0455	0.31	1.04
23657	Sc+Sm+Im	58 46.2	= 1.25	0.25	0.0433	0.1077	0.39	0.64	0.0455	0.30	0.83
	Tout	177 135.7	= 1.30	0.30	0.0147	0.1077	0.35	0.85	0.0455	0.25	1.21
0.25-0.26	E+S0+Sa	10 7.0	= 1.43	0.43	0.2855	0.3018	0.77	0.56	0.1677	0.67	0.63
38 Mpc	Sb+Sc+dE	11 6.6	= 1.67	0.67	0.3041	0.3018	0.79	0.86	0.1677	0.69	0.98
2985	Sc+Sm+Im	14 8.6	= 1.62	0.62	0.2316	0.3018	0.73	0.85	0.1677	0.63	0.98
	Tout	35 22.2	= 1.58	0.58	0.0900	0.3018	0.63	0.92	0.1677	0.51	1.13
0.17-0.20	E+S0+Sa	19 13.3	= 1.43	0.43	0.1499	0.1868	0.58	0.72	0.0709	0.47	0.90
117 Mpc	Sb+Sc+dE	35 16.0	= 2.20	1.20	0.1254	0.1868	0.56	2.12	0.0709	0.44	2.68
5076	Sc+Sm+Im	32 25.7	= 1.25	0.25	0.0780	0.1868	0.52	0.48	0.0709	0.39	0.64
	Tout	86 55.0	= 1.57	0.57	0.0364	0.1868	0.47	1.19	0.0709	0.33	1.72

Note:

- La 1^{ère} colonne indique successivement l'intervalle en décalage spectral, l'intervalle en distance comobile, et le volume comobile de la région considérée.

10^{-2} à 10^{-3} . Dans la région angulaire couverte par le relevé, la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ soutend $\sim 5 \times 25 \text{ Mpc}^2$ perpendiculairement à la ligne-de-visée, par 170 Mpc le long de la ligne de visée. Pour augmenter de façon marqué le niveau de significativité de cette structure, il faudrait qu'elle persiste au delà de l'angle solide du relevé ESO-Sculpteur avec le même contraste de densité.

Par exemple pour un angle solide de 2×2 degré-carrés, c'est à dire le double de l'étendue en ascension droite du relevé et 15 fois l'étendue angulaire en déclinaison, on calcule un niveau de significativité de 4.1σ , et 5.0σ dans le cas "SSD", soit des probabilités de 4×10^{-5} et 6×10^{-7} resp. Une région de 2×2 degré-carrés du ciel soutend une région de $\sim 55 \times 55 \text{ Mpc}^2$ à $z \sim 0.43$. Quant à la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$, son niveau de significativité pour un relevé de 2×2 degré-carrés deviendrait 1.9σ , et 2.3σ dans le cas "SSD", ce qui resterait marginal. Il sera possible d'examiner si la fluctuation de densité à $0.41 < z < 0.46$ s'étend angulairement avec la photométrie optique et infrarouge qui sera obtenue avec le VST et VISTA dans cette region du ciel (relevés KIDS et VIKING). Il faudra alors utiliser les décalages vers le rouge photométriques, avec des contraintes sur la précision des observations qui sont examinées dans la Sect. 4.1.

Il faut souligner que ce type de fluctuation est distinct des oscillations baryoniques acoustiques, qui sont détectées à des échelles similaires, mais dont le contraste est beaucoup plus faible, d'environ 10% (Eisenstein et al. 2005). En examinant les diagrammes en cone de la Fig. 3.2, on remarque que la région sur-dense à $0.41 < z < 0.46$ correspond à une collection de groupes de galaxies, et non pas à un superamas au sens standard du terme, c'est-à-dire constitué de plusieurs amas de galaxies, comme Corona Borealis par exemple (Postman et al. 1988).

AJOUT: Des fluctuations de densité dans la distribution des galaxies indiquent des fluctuations similaires dans la distribution de masse, à moins qu'il y ait des variations systématiques à grande échelle du biais. La question de la taille et de la fréquence de telles structures se pose, car ces deux paramètres sont simultanément contraints dans un Univers provenant d'un champ Gaussien de perturbations initiales (Miller et al. 2004). Je montre dans la Sect. 3.7 ci-dessous que les grandes fluctuations de densité détectées dans le relevé ESO-Sculpteur se produisent très rarement dans les simulations à N-corps du "Millennium", en bon accord avec les niveaux de significativité dérivés ici au moyen de la fonction de corrélation.

Les grands volume sondés par les grands relevés 2dF et SDSS à $z \lesssim 0.2$ donnaient l'espoir que des volumes représentatifs de la distribution des galaxies et de la distribution de matière noire sous-jacente avaient été atteints. Pourtant, des fluctuations de densité à des échelles de plus de 100 Mpc furent détectées dans ces relevés, sous la forme d'une anisotropie entre les hémisphères galactiques nord et sud. Par un lissage de la distribution des galaxies du relevé SDSS sur des échelles de $10 h^{-1} \text{ Mpc}$ d'une part, et de $0.8 h^{-1} \text{ Mpc}$ d'autre part, Einasto et al. (2003) ont extrait les superamas, ainsi que les groupes et amas individuels contenus dans ces cartes, et mesurèrent leur luminosité intégrée; il en déduisirent une anisotropie caractérisée par le fait que les superamas et amas sont 2 fois plus lumineux dans l'hémisphère nord galactique que dans l'hémisphère sud. Ces effets furent confirmés par le catalogue d'amas de galaxies du relevé 2dF (De Propriis et al. 2002). Et dans le catalogue de "vides" du relevé 2dF, Hoyle & Vogeley (2004) constatèrent que les vides de l'hémisphère sud galactique présentent des densités plus faibles que dans l'hémisphère nord.

Des effets similaires furent détectés dans les comptages infrarouge dans la bande K (obtenus par cross-identification entre le relevé 2dF et le relevé 2MASS; Cole et al. 2001), sous la forme d'une déficience de 30% à $z \leq 0.1$ dans l'hémisphère sud galactique par rapport à l'hémisphère nord (Frith et al. 2003). Cet effet fut confirmé par une réanalyse des comptage optiques dans le relevé 2dF, basée sur une photométrie améliorée permettant de vérifier l'échelle de magnitude. Ces nouvelles observations confirmèrent la déficience de 30% à $z \leq 0.1$ dans l'hémisphère sud galactique du relevé 2dF, aux magnitudes plus brillantes que ~ 17 (Buswell et al. 2004). Cette anisotropie avait été détectée auparavant dans le relevé en décalage vers le rouge "Durham-UK-Schmidt" (Ratcliffe et al. 1998). Cette sous-densité est visible dans la distribution en décalage vers le rouge de l'hémisphère sud galactique du relevé 2dF à $z \leq 0.1$, alors qu'à $z \geq 0.1$, la distribution en décalage vers le rouge atteint une densité proche de celle de l'hémisphère nord (Colless et al. 2003b).

Buswell et al. (2004) avaient également détecté un "vide local" dans l'ensemble du catalogue de l'APM (Maddox et al. 1990c) avec une déficience de 25% aux magnitudes $B \leq 17$, suggérant une sous-densité s'étendant sur $\sim 300 h^{-1} \text{ Mpc} \times 300 h^{-1} \text{ Mpc}$ sur le ciel, ainsi que sur $\sim 300 h^{-1} \text{ Mpc}$ le long de

la ligne de visée. Cette sous-densité correspond par ailleurs à la sous-densité détectée dans le catalogue d’amas de galaxies de l’hémiphère sud galactique du relevé 2dF par (De Propris et al. 2002).

Des très grande structures sur des échelle de $\sim 100 h^{-1}$ Mpc furent aussi détectées dans la distribution des radio-galaxies à $z \simeq 0.27$ (Brand et al. 2003), et dans la distribution des quasars à $z \sim 1.2$ (Clowes & Campusano 1991). Dans cette dernière analyse, la structure est associée à un excès d’absorbants MgII (Williger et al. 2002), ainsi qu’à un excès de galaxies évoluant de façon “passive” (Haines et al. 2004); une sur-densité de taille similaire est en outre détectée à $z \sim 0.8$ par Haines et al. (2004).

3.7 Comparaison avec les simulations du Millennium

J’utilise les simulations à N-corps du “Millennium” (Springel et al. 2005) pour extraire des pinceaux étroits ayant la même géométrie que le relevé ESO-Sculpteur. La simulation adaptée pour cette analyse est celle qui décrit l’évolution de $\sim 10^{10}$ particules de matière noire dans un cube de 500 Mpc de côté, dans lesquelles les galaxies sont introduites au moyen de la prescription semi-analytique de De Lucia et al. (2006). J’utilise les “instantanés” (“snapshots” en anglais) n° 63 et 48, téléchargées à l’IAP par Gilles Missonnier, et correspondant aux décalages spectraux de 0 et 0.509 resp., qui encadrent les valeurs des décalages spectraux pour la majorité des galaxies du relevé ESO-Sculpteur. Pour chacun des 2 instantanés, je tire profit des conditions aux limites périodiques de la simulation pour générer des pinceaux étroits atteignant une distance comobile de 2 000 Mpc ($z = 0.55$ avec les paramètres cosmologiques de la simulation, proches de ceux utilisés dans ce mémoire, voir p. 16).

Je souligne que l’on pourrait rendre ces simulations plus réalistes en extrayant à chaque distance les galaxies de l’instantané au décalage vers le rouge correspondant à la distance. Cela nécessite un espace disque très important (pour télécharger les simulations du “Millennium”) et un travail de programmation significatif qui n’est pas nécessaire pour les tests effectués ici (les conclusions seraient inchangées).

Pour générer les pinceaux, je choisis une face de référence, définissant un plan (X,Y), et je réplique 4 fois le cube de la simulation dans la direction opposée Z, puis l’ensemble des 4 cubes dans la direction Y. Je tire des pinceaux ayant une étendue angulaire correspondant à l’intervalle d’ascension droite et de déclinaison du relevé ESO-Sculpteur. Les pinceaux sont tirés à partir de points de référence distribués dans le plan (X,Y) avec un pas régulier de 40 Mpc en X et en Y; la ligne de visée de tous les pinceaux se trouve dans le plan (Y,Z) et fait un angle de 14.6° avec l’axe Z, ce qui décale de ~ 130 Mpc en Y le croisement de la face $N + 1$ par rapport au croisement de la face N . Cet angle est suffisamment grand pour s’assurer qu’un même pinceau échantillonne des grandes structures distinctes à chaque fois qu’il traverse une nouvelle réplique du cube de la simulation, tout en évitant de répliquer une portion d’un autre pinceau.

Je génère ainsi $11 \times 11 = 121$ pinceaux à partir d’une face. En procédant de la même façon à partir des faces (X,Z) et (Y,Z) du cube de la simulation, j’obtiens 2 fois 121 autres pinceaux, soit un total de 363 pinceaux. J’applique la procédure aux 2 instantanés à $z = 0$ et à $z = 0.509$, et je sélectionne uniquement les galaxies des pinceaux ayant une magnitude $R \leq 20.5$. Les données ESO-Sculpteur de comparaison utilisées vont au delà de $R = 20.5$, avec une limite à $R_c \leq 21.5$, et une complétude décroissante entre ces deux valeurs. On pourrait simuler la même fonction d’incomplétude en magnitude apparente dans les pinceaux extraits du “Millennium”, mais la différence dans le contraste des grandes structures interceptées par les pinceaux est négligeable.

Pour comparer les données avec les simulations, je convertis les décalages vers le rouge en distance comobile, et j’échantillonne la ligne de visée du relevé ESO-Sculpteur avec des pas de 100 Mpc à partir de l’origine, puis avec le même pas, mais avec un décalage d’un demi-pas de l’origine (50 Mpc). Ce décalage des histogrammes permet de s’assurer qu’un pic ou creu de densité est bien réel, et non pas une fluctuation statistique résultant de la position de la grille d’échantillonnage. Puis je divise chaque histogramme des données par la fonction de sélection résultant des fonctions de luminosité des trois populations de galaxies répertoriées dans la Fig. 5.1.

Comme on ne peut séparer dans les décalages vers le rouge des données les composantes spatiales et des composantes de vitesses, j’ajoute aux distances des galaxies dans les pinceaux simulées les composantes

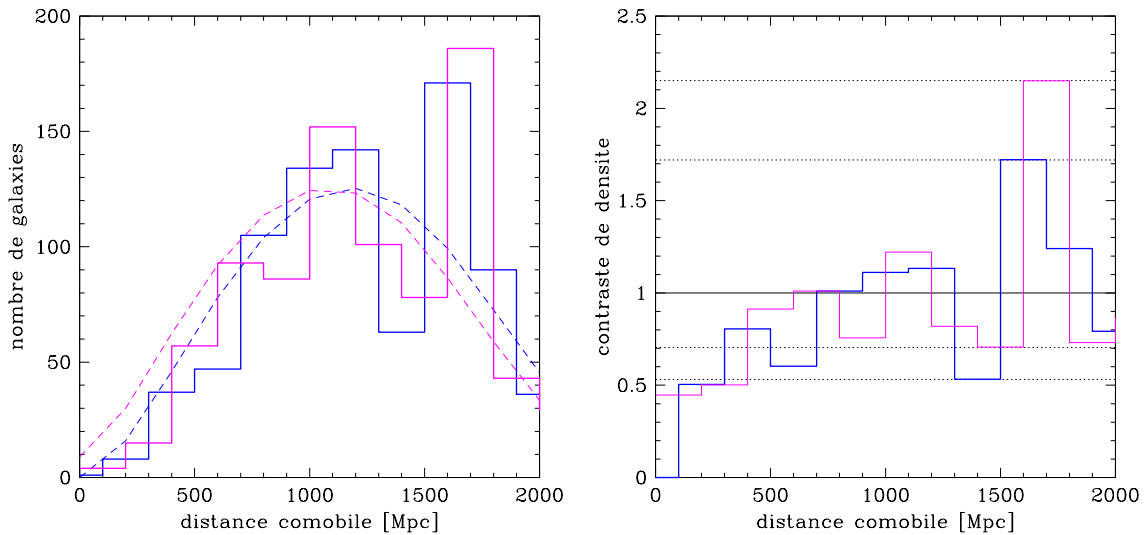


FIG. 3.5 – *A gauche, histogrammes du relevé ESO-Sculpteur à $R_c \leq 21.5$ avec un pas de 100 Mpc et décalés de 50 Mpc, et en ligne tiretée, les fonctions de sélection globales correspondantes. A droite, les distributions de contraste de densité obtenues par le rapport entre les histogrammes et les fonctions de sélections correspondantes. Les niveaux de contraste extrêmes correspondant à la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$, et à la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$ sont indiqués par des lignes pointillées.*

radiales des vitesses propres des objets, afin d’inclure, comme dans les données, les effet de dispersion des vitesses le long de la ligne de visée.

Le panneau de gauche de la Fig. 3.5 montre les histogrammes et fonctions de sélection correspondantes pour le relevé ESO-Sculpteur, et le panneau de droite, les distributions de contraste de densité obtenues en calculant les rapports de densité. On constate que la particularité de la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ est de produire 2 pics se recouvrant dans les deux histogrammes considérés, l’un avec un contraste de 1.72 et l’autre avec un contraste de 2.15 ; en outre, ces pics sont précédés par un creu de contraste 1/1.88 et 1/1.42 selon l’histogramme considéré, et correspondant à la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$, que j’ai examinée dans la Sect. 3.6. On remarque une apparente sous-estimation de la distribution observée par les fonctions de sélection du relevé ESO-Sculpteur aux distances < 500 Mpc, résultat du faible nombre de galaxies observées et des incertitudes sur le comportement des fonctions de luminosité à faible magnitude (voir Sect. 5.3).

Pour les simulations, la fonction de sélection est obtenue en effectuant la moyenne des distributions de galaxies dans les 363 pinceaux. L’absence de fluctuations marquées dans les histogrammes résultants montrés dans le panneau de gauche de la Fig. 3.6 confirme que le cube de la simulation est bien un volume “cosmologique”, compte-tenu du spectre de puissance utilisé. On remarque que la densité de galaxies décroît entre les instantanés à $z = 0.509$ et $z = 0$, à cause des fusions de galaxies. Cependant, le regroupement des galaxies augmente entre $z = 0.509$ et $z = 0$ (voir ci-dessous). En outre, le pic de la fonction de sélection se trouve à une distance comobile de ~ 650 Mpc dans les simulations, alors qu’il est à ~ 1200 Mpc dans le relevé ESO-Sculpteur. Cela résulte de la fonction de luminosité utilisée dans la prescription semi-analytique de De Lucia et al. (2006), qui est différente de celle mesurée dans le relevé ESO-Sculpteur. D’où l’importance d’utiliser les fonctions de sélection pour calculer le contraste de densité des différentes distributions de galaxies. Dans le panneau de droite de la Fig. 3.6, je montre la distribution de contraste pour un pinceau ressemblant au relevé ESO-Sculpteur par la présence d’une sur-densité et d’une sous-densité adjacentes entre 1 000 et 2 000 Mpc, mais inversées en distance (voir plus bas).

Je recherche ensuite dans les distributions de contraste de densité des 363 pinceaux, celles qui présentent un contraste d’au moins 2.15 et 1.72 dans chacun des deux histogrammes décalés avec des intervalles en distance non disjoints. On limite cette recherche à une distance comobile de l’origine entre 1 000 et 2 000 Mpc, afin de sonder la moitié la plus distante des pinceaux ; cela correspondant à l’intervalle

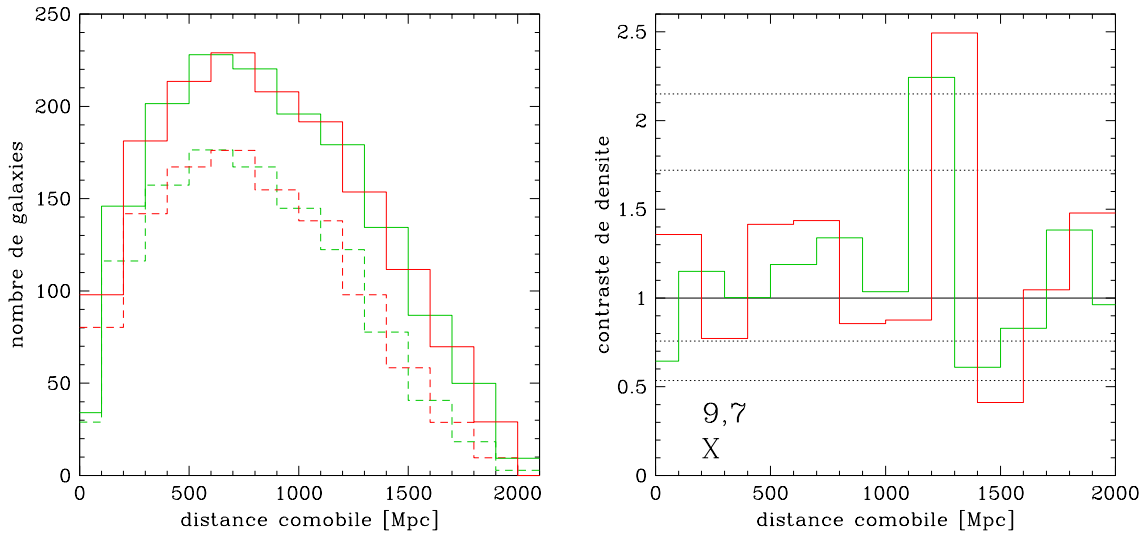


FIG. 3.6 – *A gauche, histogrammes de la moyenne des 363 pinceaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$ avec un pas de 100 Mpc et décalés de 50 Mpc, pour les instantanés à $z = 0.509$ (ligne continue) et à $z = 0$ (ligne tirée), produisant la fonction de sélection des pinceaux. A droite, les distributions de contraste de densité pour le pinceau $[0,9,Y]$ (voir Fig. 3.7) dans l’instantané à $z = 0.509$.*

de décalage spectral $0.26 < z < 0.55$, qui contient la sur-densité ; à plus faible distance, on échantillonne une étendue transverse plus petite qu’à $z > 0.26$, et la probabilité de trouver des fluctuations de densité d’un contraste donné est par conséquent élevée.

En utilisant l’instantané à $z = 0.509$, je trouve 13 pinceaux avec des contrastes de densité supérieurs à 2.15 et 1.72, et 24 avec l’instantané à $z = 0$, soit des probabilités de 3.6% et 6.6% resp. La différence obtenue entre les deux instantanés résulte du fait qu’au court du temps, et donc quand z décroît de 0.509 à 0, le regroupement des galaxies augmente. Le décalage vers le rouge $z = 0.509$ correspondant à une distance comobile de 1873 Mpc, cet instantané est ainsi plus adapté pour rechercher les fluctuations de densité dans l’intervalle de distance comobile 1 000 - 2 000 Mpc. Si je prend en compte l’incertitude de Poisson de 13% sur les densité de seuil, et que je diminue d’autant les seuils, soit à 1.9 et 1.5, je trouve 22 pinceaux dans l’instantané à $z = 0.509$, soit une probabilité de 6.1% (et 53 pinceaux à $z = 0$, soit 14.6%). Ces diverses probabilités correspondent à un niveau de significativité à $\sim 2 - 2.5$, soit légèrement moins que les niveaux calculés au moyen de la fonction de corrélation dans la Sect. 3.6.

Je montre dans la Fig. 3.7 les distributions de contraste de densité dans les 13 et 24 pinceaux contenant au moins une sur-densité entre 1 000 et 2 000 Mpc avec un contraste supérieur ou égal à la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ du relevé ESO-Sculpteur ; le panneau supérieur correspond à l’instantané $z = 0$, et le panneau inférieur, à l’instantané $z = 0.509$. On peut dans un premier temps observer directement l’augmentation du contraste entre $z = 0.509$ et $z = 0$ en comparant dans la Fig. 3.7 les distributions pour les pinceaux communs ($[4,5,X]$, $[10,7,Y]$, et $[10,7,Z]$ par exemple).

On remarque ensuite dans la Fig. 3.7 qu’un seul pinceau dans l’instantané à $z = 0.509$ présente une sous-densité directement adjacente dans l’intervalle 1 000-2 000 Mpc (et pour les deux échantillonnages d’histogramme) et bornée de l’autre côté par une région de contraste de densité ~ 1 (ce qui permet de délimiter la sous-densité de part et d’autre) : il s’agit du pinceau $[9,7,X]$, qui est montré de plus près dans le panneau de droite de la Fig. 3.6. Dans ce pinceau, la sur-densité se positionne cependant sur la ligne-de-visée *avant* la sur-densité, contrairement aux données. Pour les autres pinceaux, la sur-densité est soit très étendue spatialement (sur plus de 300 Mpc dans les pinceaux $[4,5,X]$, $[10,7,Y]$ et $[7,3,Z]$, par exemple), soit elle est adjacente à des régions de contraste proche de 1 (pinceaux $[0,2,X]$, $[1,3,Z]$, et $[10,7,Z]$ par exemple), soit la sous-densité n’est pas bornée du côté opposé à la sur-densité (pinceau $[2,6,Y]$ par exemple). Dans l’instantané à $z = 0$, on ne trouve pas de pinceau supplémentaire qui reproduise la triple alternance sous-densité/sur-densité avec les seuils requis.

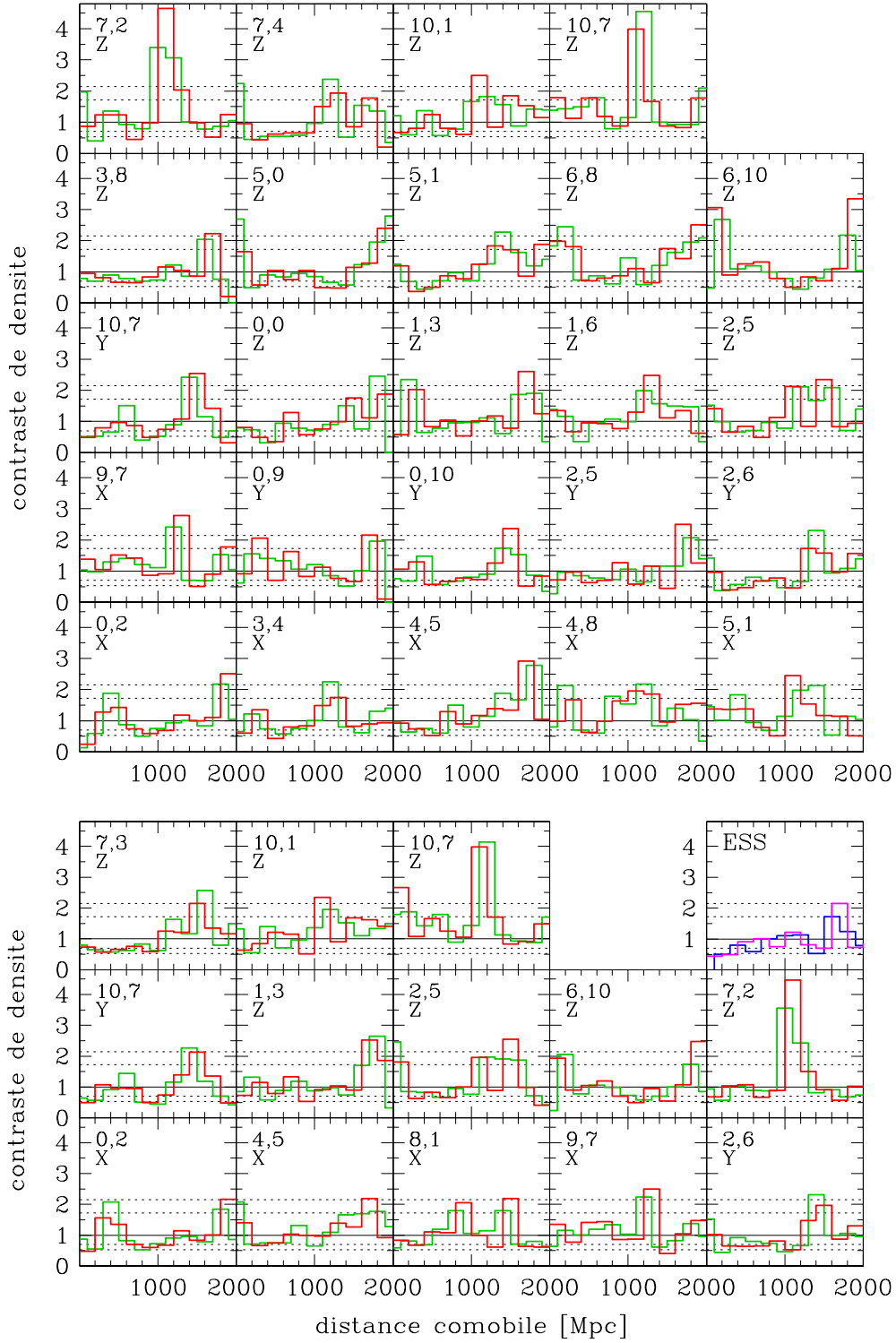


FIG. 3.7 – Distribution des contrastes de densité pour les pinceaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$ avec un pas de 100 Mpc, présentant une sur-densité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à $0.41 < z < 0.46$ dans le relevé ESO-Sculpteur (dans les histogrammes décalés). Les pinceaux sélectionnés sont extraits des instantanés à $z = 0$ (panneau du haut) et à $z = 0.509$ (panneau du bas; voir Fig. 3.8 pour la nomenclature des pinceaux). Pour comparaison, le relevé ESO-Sculpteur est inséré dans le panneau du bas.

Les Fig. 3.8 et 3.9 montrent pour les instantanés à $z = 0.509$ et $z = 0$ resp., les diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur et les différents pinceaux de la Fig. 3.7, qui contiennent une sur-densité entre 1 000 et 2 000 Mpc ; dans chaque pinceau, celle-ci est indiquée par un crochet définissant les limites correspondant aux histogrammes de la Fig. 3.7. Cette figure illustre la diversité des pinceaux obtenus, et atteste que la méthode utilisée permet de produire des échantillons dans lesquelles les grandes structures interceptées sont distinctes. On peut voir également que les sur-densités détectées correspondent parfois à plusieurs groupes, feuillets ou amas séparés par des vides, comme c'est le cas par exemple pour les pinceaux [8,1,X], [2,5,Z], [10,1,Z], et [9,7,X] (ce dernier est celui qui présente l'alternance sur-densité/sous-densité similaire en contraste aux observations). Dans d'autres pinceaux, la sur-densité est répartie sur tout l'intervalle, ressemblant plus aux données (pinceaux [2,6,Y], [10,7,Y], et [7,2,Z] par exemple).

En conclusion, la sur-densité détectée dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$ du relevé ESO-Sculpteur est rare (avec une probabilité de $\sim 4\%$), et sa juxtaposition avec la sous-densité à $0.33 < z < 0.39$ en fait un système encore plus rare, que l'on ne trouve dans 1 ou 0 pinceau (si l'on tolère ou pas l'inversion le long de la ligne de visée). Cela donne une probabilité $< 1/363$, c'est-à-dire $< 0.3\%$, soit 2.75σ , ce qui est en meilleur accord avec les calculs utilisant la fonction de corrélation dans la Sect. 3.6. Le volume de la simulation étant au départ un cube de 500 Mpc de côté, on peut en déduire que ce volume est trop faible pour y rencontrer les grandes fluctuations de densité trouvées dans le relevé ESO-Sculpteur. Des simulations dans un cube plus étendu seraient ainsi nécessaires pour évaluer la probabilité d'occurrence de ces structures.

Pour information, je montre dans la Fig. 3.10 un diagramme en cône pour une tranche de déclinaison aussi fine que le relevé ESO-Sculpteur, mais s'étendant sur 90° en ascension droite. L'instantané utilisé est celui à $z = 0.509$, et la tranche contient 190 277 galaxies avec une magnitude apparente en $R < 20.5$. Comme pour les pinceaux (mais l'effet n'est pas visible à l'œil pour les petits angles), les diagrammes en cône présentés ici prennent en compte la décroissance supplémentaire en $1/(1+z)$ par rapport au calcul Euclidien de l'étendue transverse interceptée par un angle fixe sur le ciel. La Fig. 3.11, permet de faire la comparaison avec l'instantané à $z = 0$, et de voir l'évolution des grandes structures dans cet intervalle de décalage vers le rouge, sous la forme d'un accroissement du regroupement des galaxies, et d'un évidement des régions sous-denses. Ce diagramme ne contient que 129 056 galaxies, le nombre total de galaxies décroissant dans le temps à cause des fusions de galaxies. Enfin, la Fig. 3.12 montre, la distribution en distance comobile des objets dans l'instantané à $z = 0$, sans ajouter les composantes radiales des vitesses propres des galaxies. Par comparaison avec la Fig. 3.11, on peut voir que les diagrammes en décalage vers le rouge conduisent à un renforcement du contraste des structures à cause de la chute des galaxies vers les régions de haute densité que sont les amas et les feuillets de galaxies. On peut cependant voir en "plissant les yeux" que les fluctuations de densité aux échelles de ~ 100 Mpc sont invariantes d'une carte à l'autre.

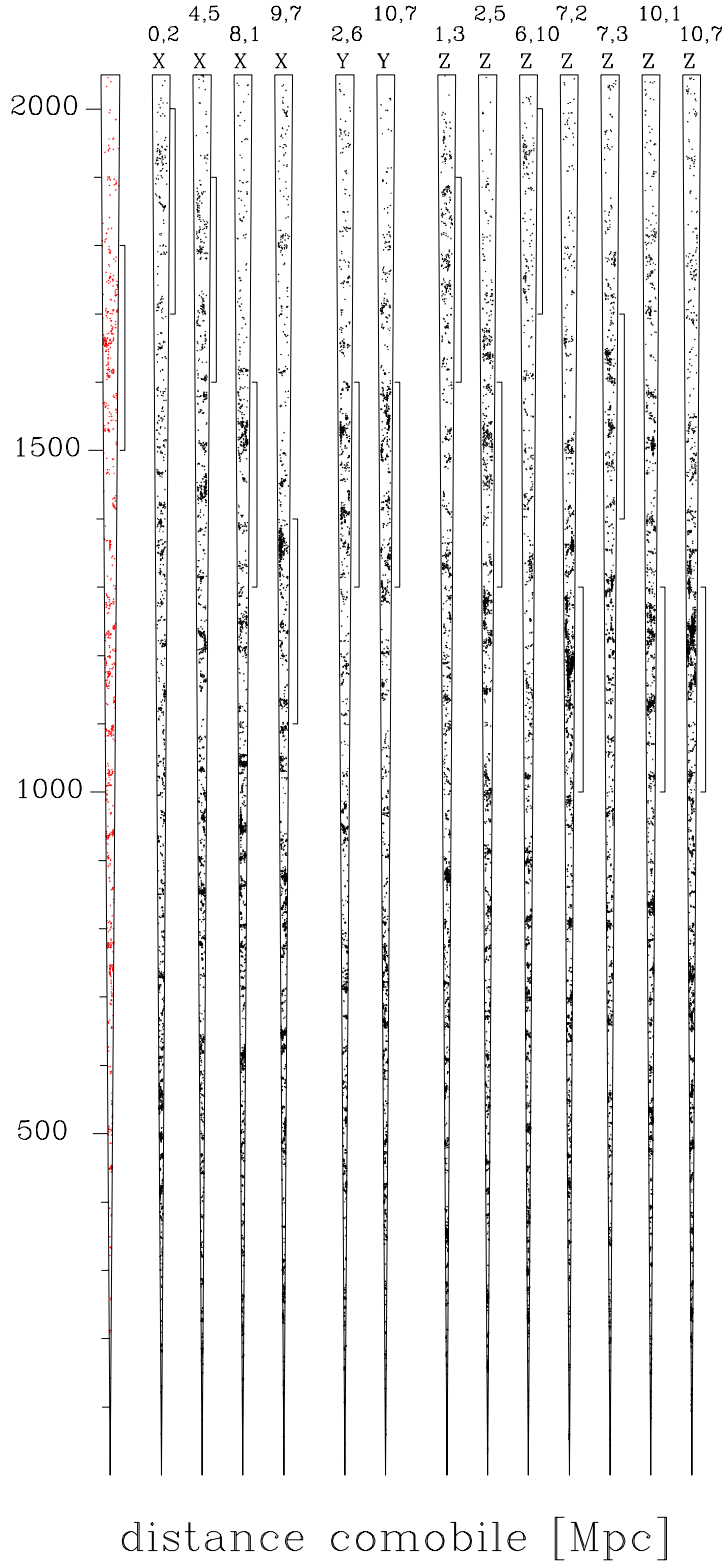


FIG. 3.8 – Diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur (à gauche et en rouge), et pour les pinceaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$, dans l’instantané à $z = 0.509$, qui présentent une sur-densité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à $0.41 < z < 0.46$ dans le relevé ESO-Sculpteur (dans les histogrammes décalés). Les chiffres et lettres indiquent les indices du pinceau sur la face d’origine, et la direction perpendiculaire à celle-ci resp.

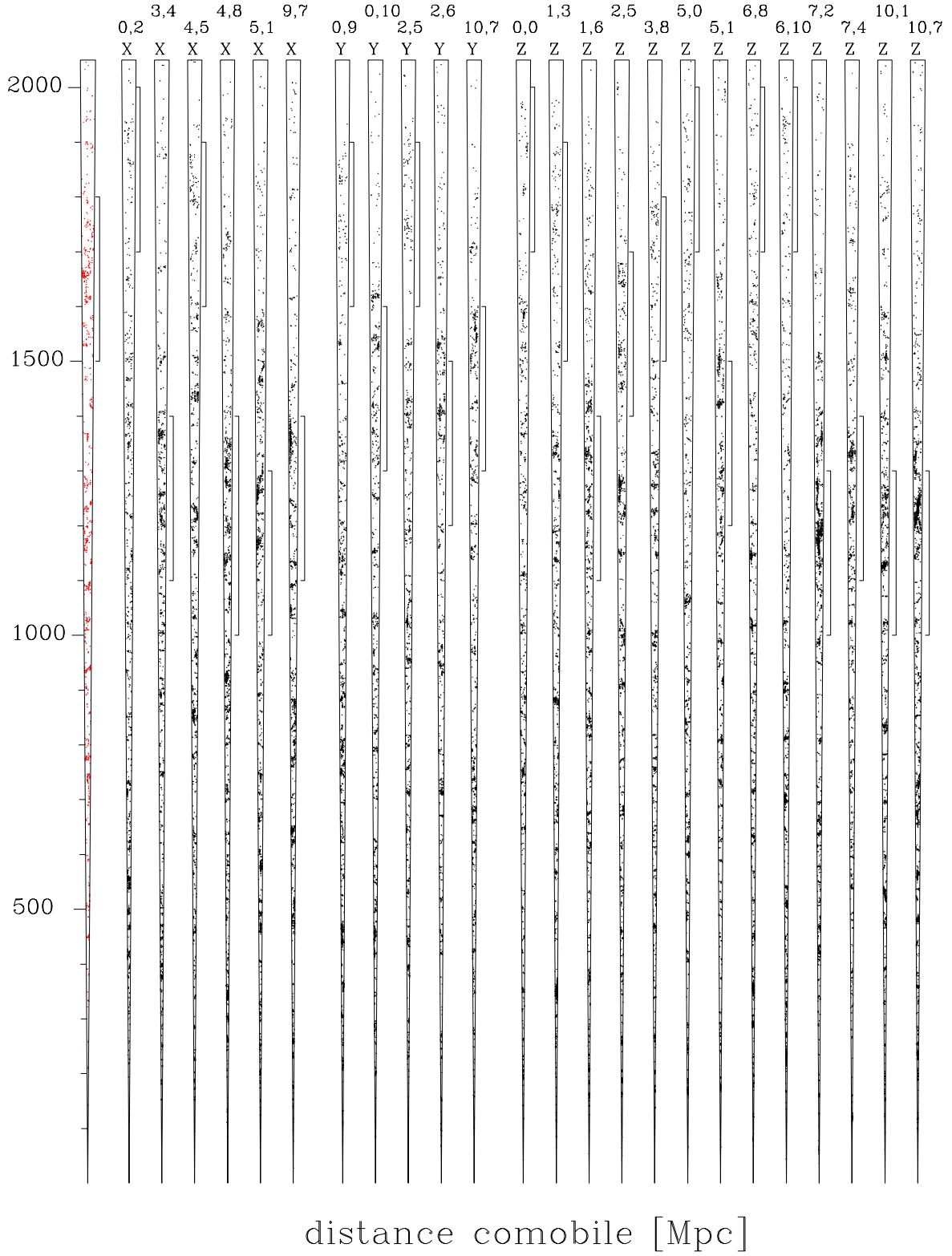


FIG. 3.9 – Diagrammes en cône pour le relevé ESO-Sculpteur (à gauche et en rouge), et pour les pincesaux de la simulation “Millennium” à $R_c \leq 20.5$, dans l’instantané à $z = 0$, qui présentent une sur-densité dans l’intervalle 1 000 - 2 000 Mpc avec les mêmes contrastes que la structure à $0.41 < z < 0.46$ dans le relevé ESO-Sculpteur (dans les histogrammes décalés). Les chiffres et lettres indiquent les indices du pinceau sur la face d’origine, et la direction perpendiculaire à celle-ci resp.

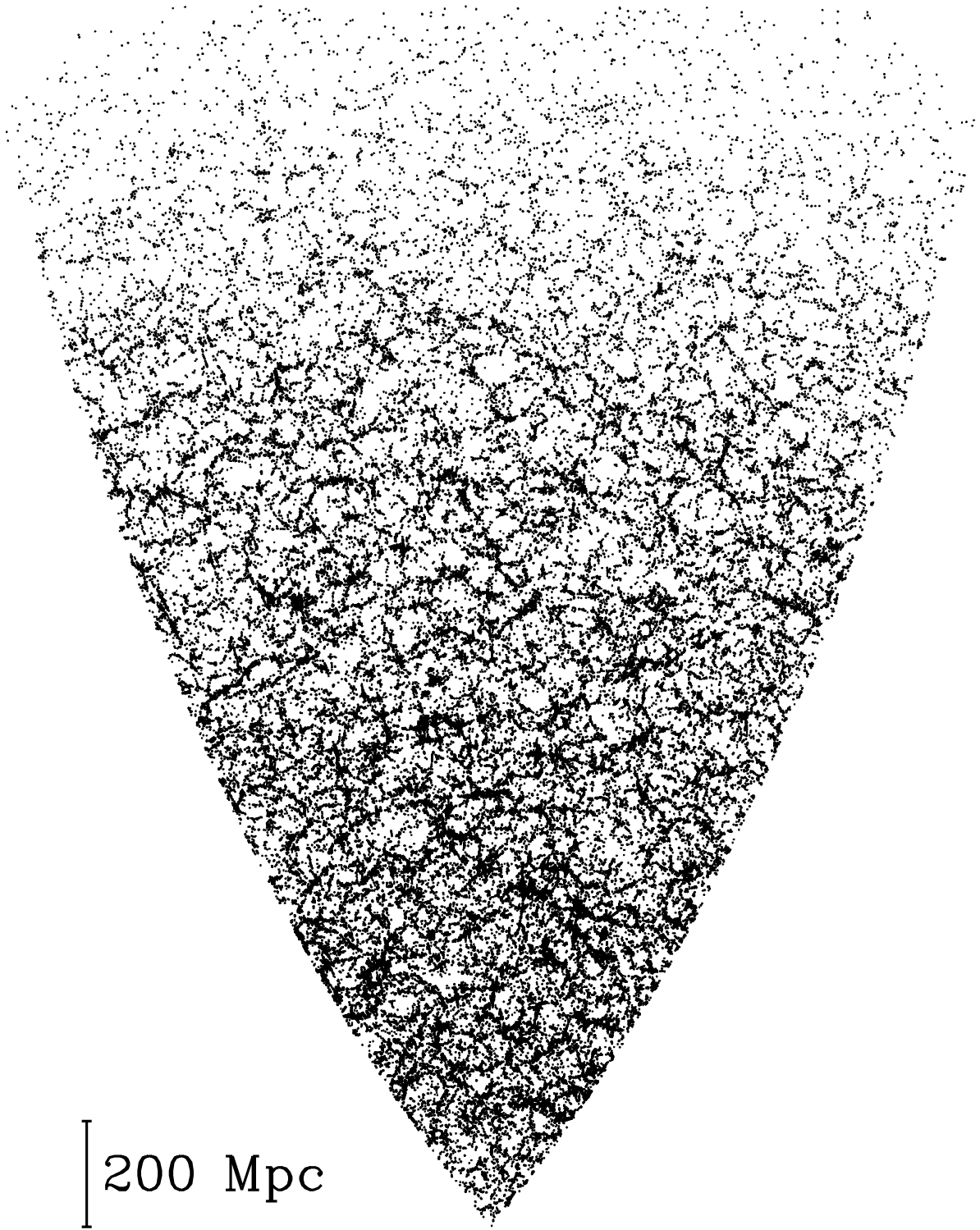


FIG. 3.10 – Diagramme en cône pour une tranche en déclinaison de même épaisseur que le relevé ESO-Sculpteur, centrée à une déclinaison de 25° , et s'étendant sur 90° en ascension droite. L'instantané à $z = 0.509$ est utilisé à toutes les distances, la distance maximale est de 2 460 Mpc, et les galaxies sont sélectionnées par une limite de 20.5 en magnitude apparente dans le filtre R.

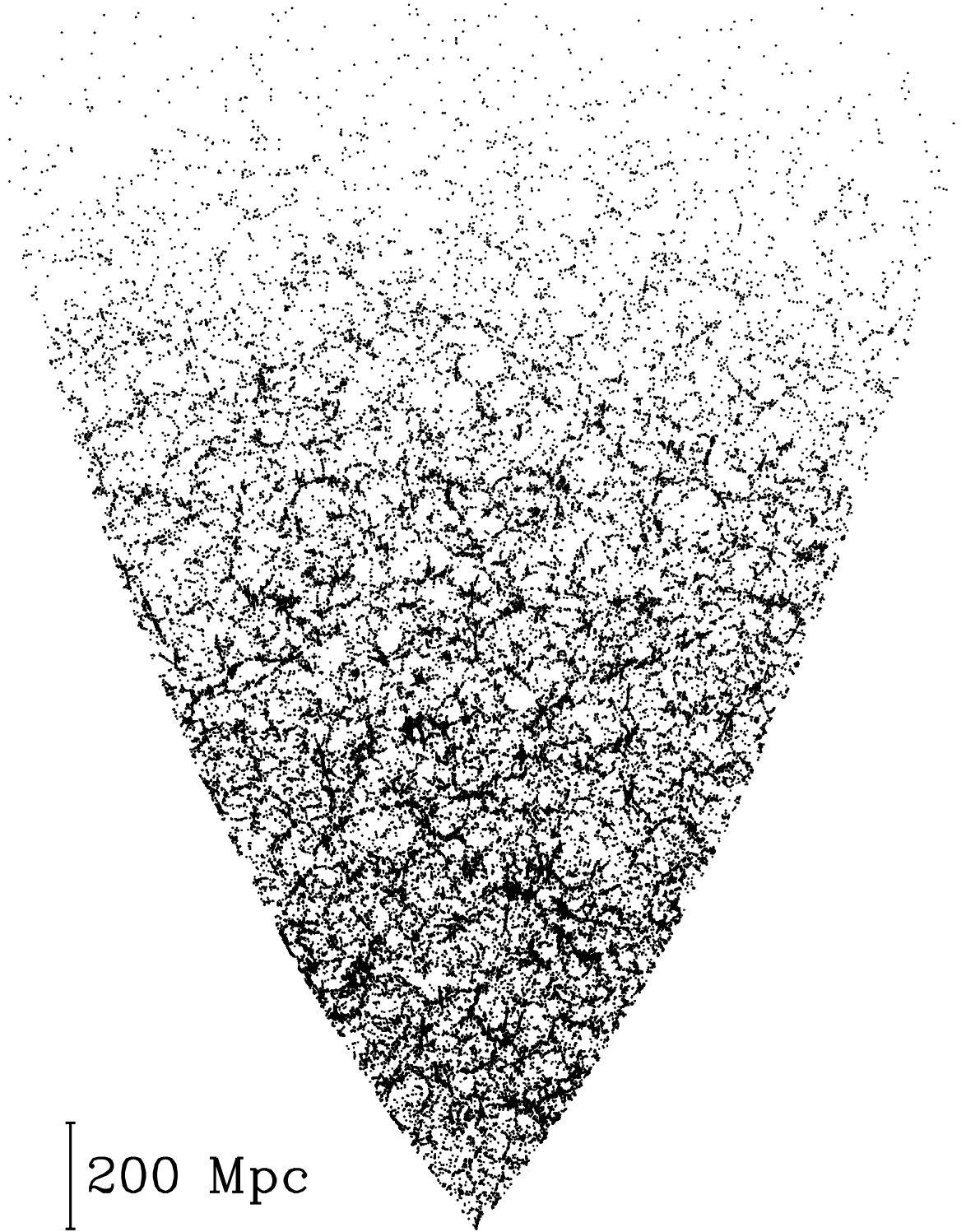


FIG. 3.11 – Même chose que dans la Fig. 3.10, mais pour l'instantané à $z = 0$ (et incluant les composantes radiales des vitesses propres des galaxies).

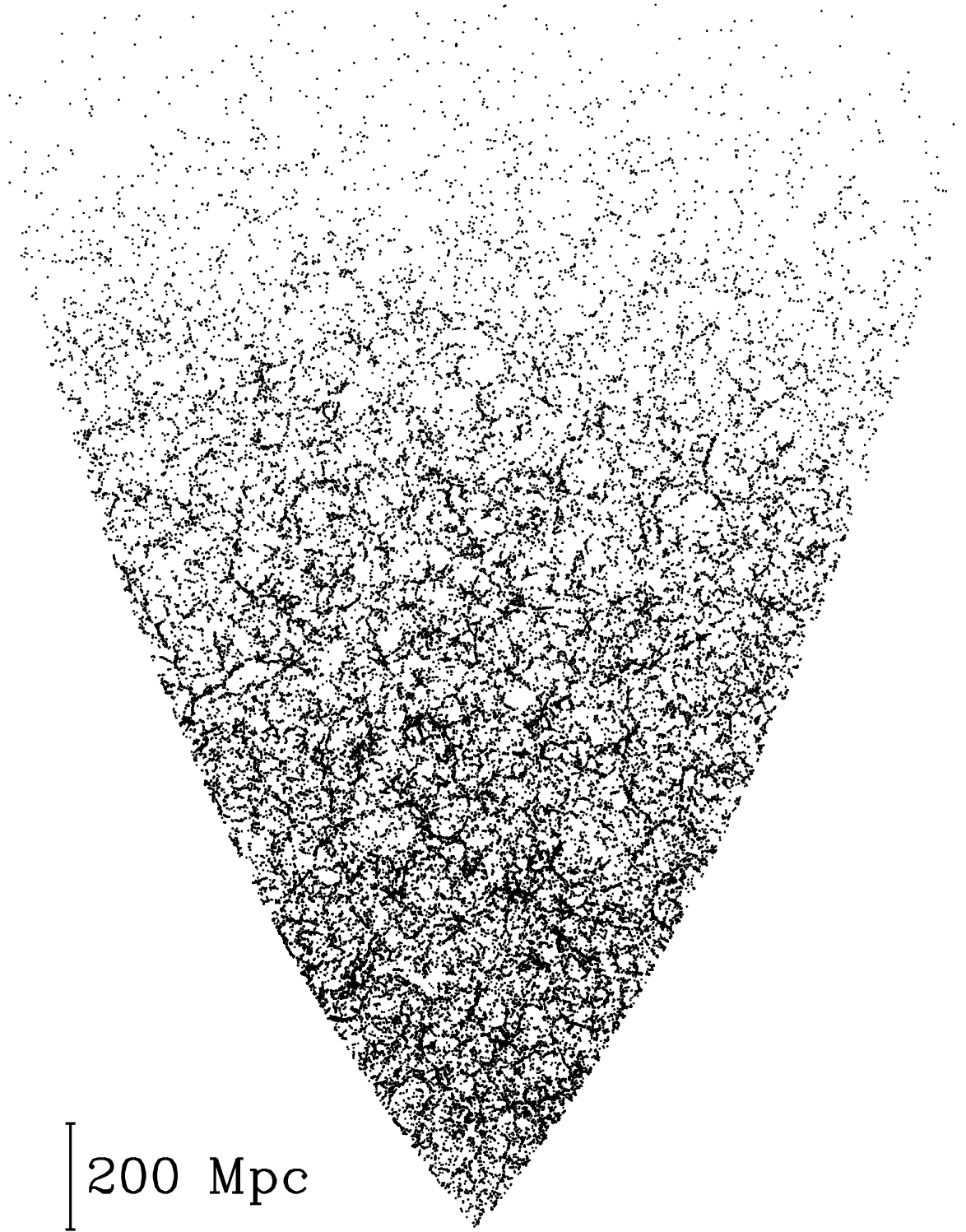


FIG. 3.12 – Même chose que dans la Fig. 3.11 pour l'instantané à $z = 0$, mais en ignorant les composantes radiales des vitesses propres des galaxies.

Chapitre 4

Décalages et types photométriques

Il est intéressant d'utiliser le logiciel ZPEG (Le Borgne & Rocca-Volmerange 2002) de mesure des décalages vers le rouge à partir de la photométrie, afin de tester les mesures de types spectraux des galaxies ESO-Sculpteur, ainsi que la détection des très grandes fluctuations de densité comme celle mise en évidence dans la Sect. 3.6.

ZPEG effectue un ajustement par moindres-carrés des spectres produits par les scénarios d'évolution des galaxies développé par PÉGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1997, voir aussi <http://www2.iap.fr/~pegase>). A la différence d'un ajustement de spectres empiriques (Bolzonella et al. 2000; Ilbert et al. 2006; Brimiouille et al. 2008; Coupon et al. 2009), le code ZPEG présente l'intérêt de fournir non seulement une mesure du décalage spectral déduit du meilleur ajustement de spectre synthétique, mais aussi le type du scénario ajusté, et l'évolution temporelle de tous ses paramètres (taux de formation d'étoiles, masse stellaire, âge stellaire moyen etc.). On peut ainsi déduire comment serait le spectre observé une fois évolué jusqu'à $z = 0$, ou comment il serait à tout autre âge antérieur. Gabasch et al. (2004) ont montré que l'ajustement de spectres empiriques donne de bons résultats pour la mesure des décalages photométriques dans le large intervalle de décalage spectral $0.1 < z < 5$.

4.1 Comparaison des décalages spectraux

J'utilise les scénarios de tous les types disponibles dans PEGASE2 : E, S0, Sa, Sb, Sbc, Sc, Sd, Im, et Starburst. J'applique en outre la contrainte d'âge à $z = 0$: on autorise uniquement les spectres des scénarios dont l'âge est inférieur à celui de l'Univers à chaque décalage vers le rouge z (Le Borgne & Rocca-Volmerange 2002); de surcroît, les spectres des scénarios E à Sd doivent être âgés d'au moins 11 milliards d'années au temps présent ($z = 0$), et ceux des Im d'au moins 9 milliards d'années. Ces valeurs de 11 et 9 milliards d'années sont les âges à $z = 0$ d'une galaxie qui se serait formée à $z = 2.6$ et $z = 1.4$ resp., impliquant des z de formation plus élevés. En revanche, les scénarios de Starburst peuvent être arbitrairement jeunes à $z = 0$, et donc à toutes les valeurs de z . Sachant que le z maximal mesuré pour le relevé est de 0.883, je borne les mesures à $z < 1$, et j'utilise un pas en décalage spectral de 0.001 (du même ordre de grandeur que la précision des mesures spectroscopiques). J'ai effectué des essais en introduisant la possibilité d'une extinction interne maximale de 0.02 mag et 0.04 mag. Cela introduit des dégénérescences et n'améliore par la mesure des décalages spectraux, donc cette option n'est pas utilisée dans les résultats décrits ci-dessous.

La Fig. 4.1 montre les décalages spectraux photométriques z_{phot} obtenus en utilisant la photométrie B_J V_J et R_c des galaxies du relevé ESO-Sculpteur ayant par ailleurs une mesure de décalage spectral spectroscopique z_{spec} . On observe une grande dispersion $\sigma_z \simeq 0.16$, où σ_z est défini comme $\sigma(z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$, avec des dégénérescences pour $z_{\text{spec}} \sim 0.42$, et des effets systématiques pour $z_{\text{spec}} < 0.2$.

Une partie de la dispersion et des effets systématiques dans le panneau de gauche de la Fig. 4.1 peuvent être réduits en améliorant la précision de la photométrie optique. Pour simuler de plus faibles incertitudes sur les magnitudes dans les bandes B_J V_J et R_c pour l'échantillon spectroscopique des

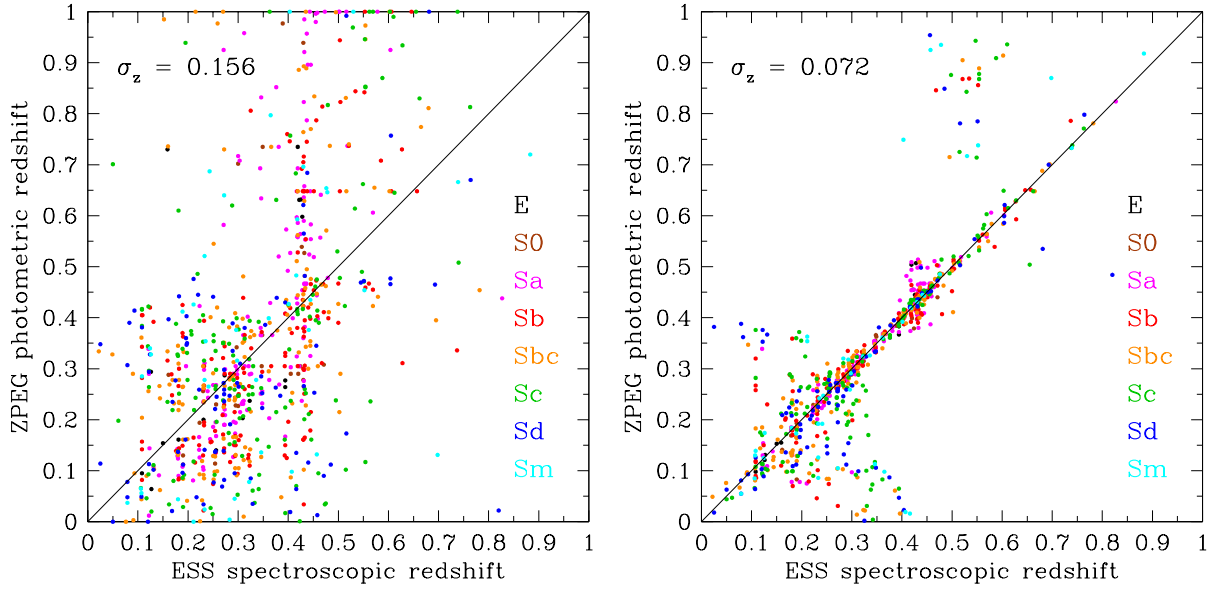


FIG. 4.1 – *A gauche, comparaison des décalages photométriques obtenus par ZPEG en utilisant la photométrie $B_J V_J$ et R_c et les décalages spectroscopiques des galaxies du relevé ESO-Sculpteur. Les types spectraux (voir Sect. 2.4) sont indiqués par des couleurs différentes. A droite, on utilise la photométrie $B_J V_J$ et R_c synthétique “parfaite” générée par ZPEG au moyen des décalages spectroscopiques, et on introduit une incertitude Gaussienne avec un écart-type de 0.01 sur les magnitudes.*

galaxies ESO-Sculpteur, j'utilise la photométrie calculée par ZPEG lorsqu'on effectue les ajustements des scénarios PEGASE en utilisant les décalages spectroscopiques effectivement mesurés, que l'on appelle ici “photométrie idéale”. J'ajoute ensuite un bruit aléatoire Gaussien d'écart-type σ_{mag} choisi. Le panneau de droite montre la comparaison des z_{phot} avec les z_{spec} obtenue avec $\sigma_{\text{mag}} = 0.01$ mag. : la dispersion globale se réduit à $\sigma_z = 0.07$. On observe cependant une persistance de dégénérescences à $z_{\text{spec}} \lesssim 0.3$ et à $z_{\text{spec}} \gtrsim 0.5$, affectant de préférence les galaxies de type spectral Sbc et plus tardives. Pour une partie des galaxies situées dans l'intervalle $0.35 \lesssim z_{\text{spec}} \lesssim 0.6$, la dispersion est même plus faible, $\sigma_z = 0.02$, indiquant que lorsqu'on dispose uniquement de la photométrie optique, il y a une fenêtre $0.35 < z < 0.6$ dans laquelle on peut obtenir des décalages photométriques de bonne précision. Enfin, on remarque que pour reproduire statistiquement le diagramme du panneau de gauche de la Fig. 4.1, je dois introduire des incertitudes $\sigma = 0.07$ mag. sur la photométrie idéale, soit un peu plus que les incertitudes estimées des observations (0.05 mag.).

Les divers effets systématiques sur les z_{phot} observés dans la Fig. 4.1 sont symptomatiques des limites de l'utilisation de la photométrie optique, qui contraint trop faiblement les vieilles populations stellaires des galaxies, car elle est sensible aux sursauts de formation d'étoiles, alors que ce sont les vieilles populations d'étoiles qui fournissent pour une galaxie un âge fiable et évoluant temporellement de façon monotone. Pour illustrer ces effets, j'ai complété la photométrie observée dans les bandes optiques du relevé spectroscopique ESO-Sculpteur par la photométrie synthétique “parfaite” calculée par ZPEG dans les bandes infrarouges proches I_c et JHK (filtres du relevé 2MASS Skrutskie 2001); la photométrie infrarouge est dispersée au moyen d'une Gaussienne d'écart-type $\sigma_{\text{mag}} = 0.05$ mag.

Dans le panneau de gauche de la Fig. 4.2, on constate que l'ajout de l'infrarouge proche réduit considérablement la dispersion ainsi que les effets systématiques dans les valeurs de z_{phot} . La dispersion sur les écarts de décalage vers le rouge devient $\sigma_z = 0.05$, soit le tiers de la valeur lorsqu'on utilise uniquement la photométrie optique, et proche des incertitudes sur les magnitudes (ou des incertitudes relatives sur les flux, car $\sigma(f)/f \simeq 0.4 \ln 10 \simeq 0.92 \sigma_{\text{mag}}$). Dans le panneau de droite de la Fig. 4.2, je simule l'effet d'une diminution des incertitudes sur la photométrie optique et infrarouge proche à 0.01 mag.. Il en résulte une dispersion $\sigma_z/(1+z) = 0.008$ sur les écarts entre les décalages photométriques

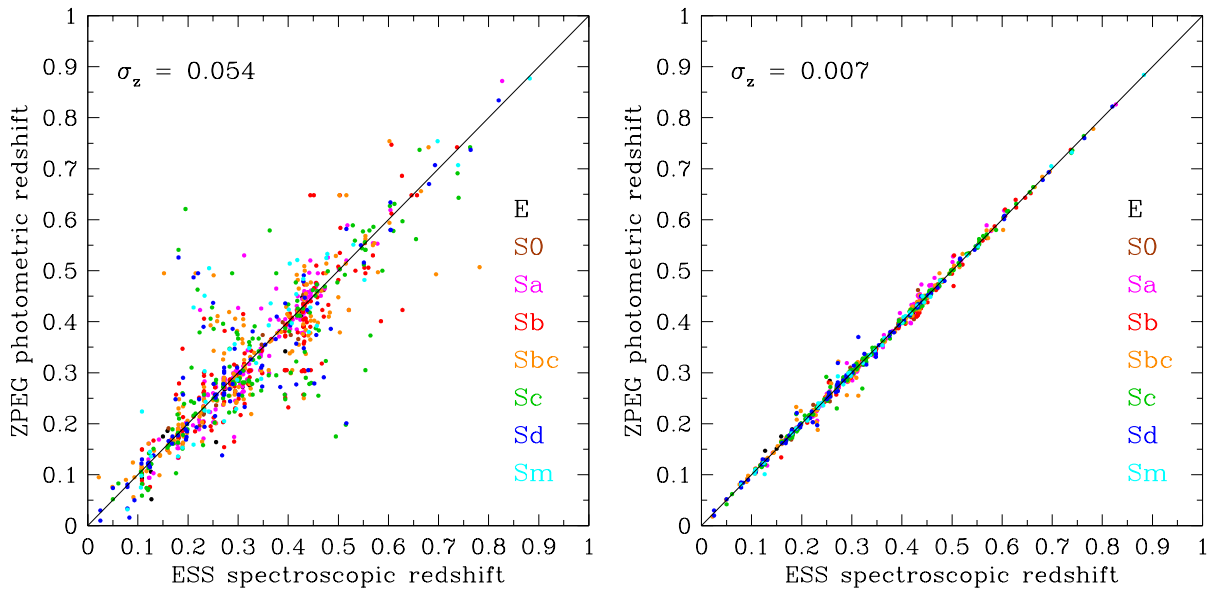


FIG. 4.2 – *A gauche, comparaison des décalages photométriques calculés par ZPEG en utilisant la photométrie B_J V_J et R_c observée et la photométrie infrarouge I_cJHK synthétique “parfaite” calculée par ZPEG dans laquelle des incertitudes Gaussiennes de 0.05 mag. sont introduites. A droite, on utilise la photométrie synthétique “parfaite” dans les bandes optique et infrarouges dans laquelle sont introduites des incertitudes de 0.01 mag. dans chaque bande.*

et spectroscopique, soit une valeur à nouveau similaire aux incertitudes sur les magnitudes.

4.2 Comparaison des types spectraux

Par ailleurs, je compare la classification spectrale du relevé ESO-Sculpteur avec celle fournie par ZPEG. On rappelle que les types spectraux furent obtenus par projection des spectres de Kennicutt (1992) dans l’espace des composantes spectrales principales des spectres (voir Sect. 2.4). Ici, l’ajustement par moindres carrés des scénarios des différents types du modèle PEGASE fournit, lorsqu’on utilise la valeur mesurée du décalage vers le rouge “spectroscopique”, le meilleur ajustement de spectre synthétique, et par conséquent le type spectral au sein du modèle. Le panneau de gauche de la Fig. 4.3 montre les types ZPEG ainsi obtenus (et notés “types spectrophotométriques”) en comparaison avec les types spectraux provenant.

On observe dans ce graphique une grande dispersion de la mesure des types, en particulier pour les types spectraux Sbc et Sc, même si leur type ZPEG moyen est proche du type spectral, comme indiqué par la ligne pointillée. En outre, des déviations systématiques sont visibles dans les valeurs moyennes, les plus marquantes apparaissant pour les types spectraux Sa et Sb : les types ZPEG de ces objets sont plus précoces. On remarque aussi une forte asymétrie (rendu visible par un décalage important entre les courbes des types ZPEG moyens et médians) pour les types spectraux Sc, Sd et Sm, qui s’accompagne d’un étalement des types ZPEG jusqu’aux types spiraux les plus précoces (Sa). Cela implique que les distributions d’énergie spectrale obtenues par la photométrie du relevé ESO-Sculpteur sont plus rouges, et plus bleues que celles obtenues par spectroscopie pour les galaxies de types Sa-Sb, et Sc-Sd resp.

Le panneau de droite de la Fig. 4.3 montre que lorsque l’on n’utilise pas la connaissance des décalages vers le rouge spectroscopiques pour l’ajustement par ZPEG, on obtient des types spectro-photométriques un peu plus dispersés, et avec des déviations systématiques plus importantes, notamment pour les types spectraux Sa, Sb et Sbc. Mais l’effet dominant demeure la différence entre les distributions en énergie spectrale obtenues par la photométrie et la spectroscopie, comme le montre la comparaison avec le panneau

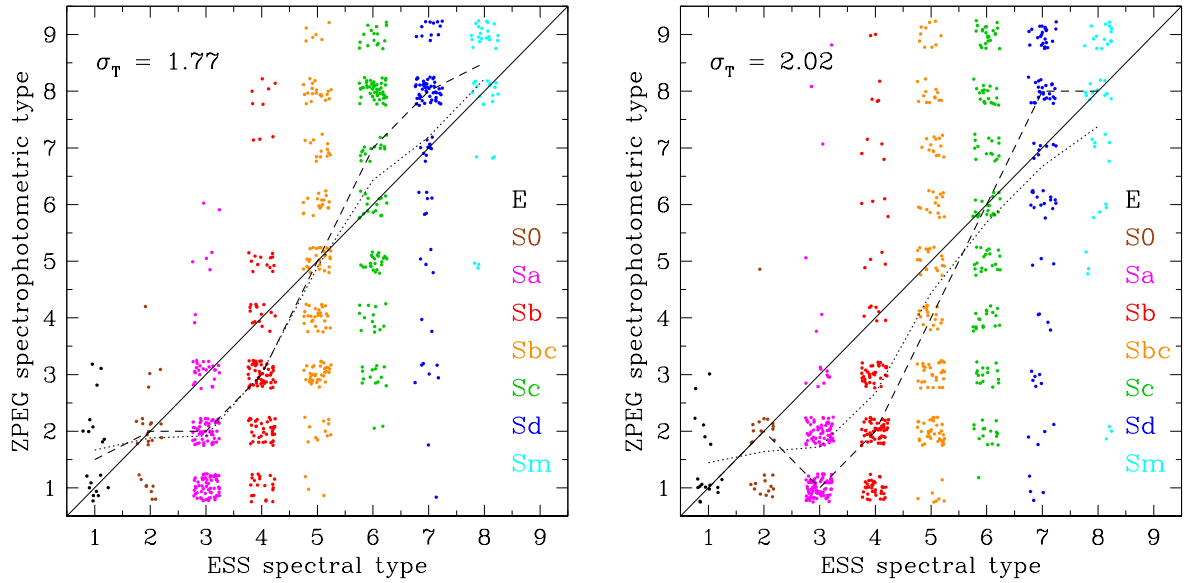


FIG. 4.3 – A gauche, la comparaison des types spectraux du relevé ESO-Sculpteur (notés ESS) avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie B_J V_J et R_c et des décalages spectraux spectroscopiques. A droite, la même chose en n'utilisant pas la connaissance a priori des décalages spectroscopiques. Dans les deux panneaux, la ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types spectral, et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points.

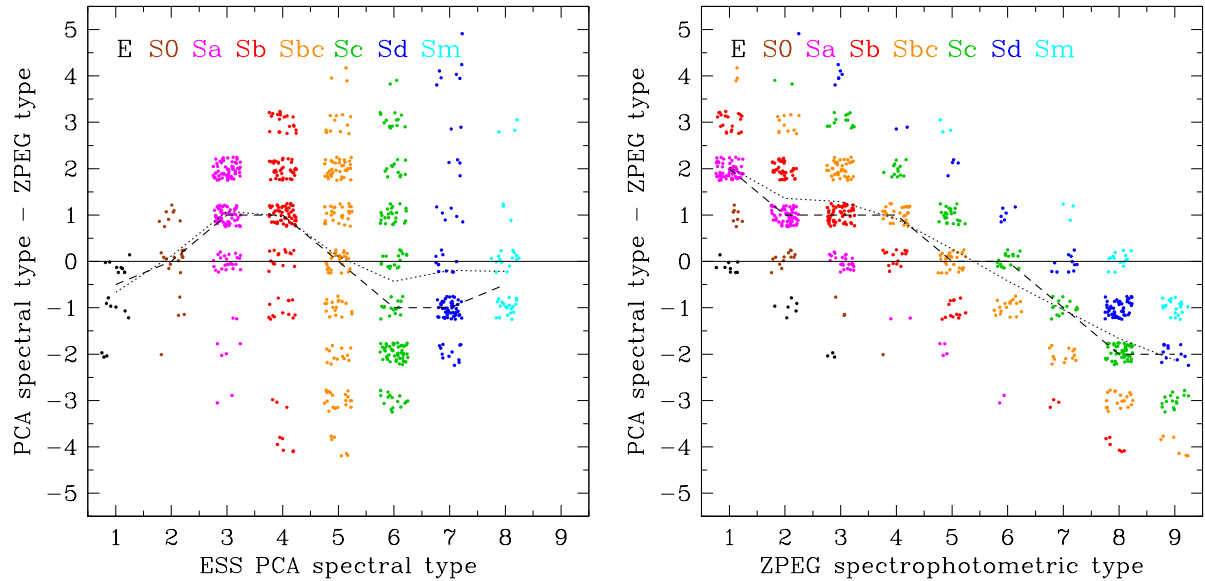


FIG. 4.4 – La différence entre le type spectral du relevé ESO-Sculpteur (noté ESS), et le type spectro-photométrique dérivé avec ZPEG à partir de la photométrie B_J V_J et R_c et des décalages vers le rouge spectroscopiques, en fonction, à gauche, du type spectral, et à droite, du type ZPEG. Dans les deux panneaux, la ligne pointillée montre la moyenne des différences de types, pour chaque type (spectral ou spectro-photométrique), et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points.

de gauche.

Les origines de ces différences sont diverses. D'une part, la dispersion et les effets systématiques sur la calibration en flux des spectres de fentes intervient. En outre, on montre dans la Sect. 3.3 de la Partie II que l'orientation variable des galaxies conduit à un rougissement et donc à une dispersion importantes des types spectro-photométriques avec un rougissement des distributions en énergie spectrale. Ces effets affectent forcément la spectroscopie de fente des objets, qui souffre de surcroît de biais d'ouverture : les objets ayant des composantes de bulbe et de disque aux couleurs (et donc spectres) différents, auront des spectres variables selon l'orientation de la fente par rapport au grand axe de la galaxie.

Nous avons vu dans la Sect. 2.4 qu'il y a un rougissement des couleurs synthétiques calculées à partir des spectres par rapport à la photométrie *BVR* du relevé (en partie expliqué par le défaut de sensibilité des CCD dans le bleu, en partie par la réfraction atmosphérique différentielle). Un rougissement des spectres devrait conduire à des types spectraux plus précoces, donc inversement on s'attend à ce que les types spectro-photométrique par ZPEG soient plus tardifs que les types spectraux. On observe cela uniquement pour les types tardifs. Pour les types précoces, l'effet est inversé.

La différence entre les deux classifications (spectrale et spectro-photométrique) est montrée dans la Fig. 4.4, en fonction de l'une ou l'autre classification (selon le panneau). L'effet systématique le plus marqué se produit lorsqu'on examine la différence de type en fonction du type spectro-photométrique de ZPEG, avec une dépendance presque linéaire entre la différence moyenne de type et le type ZPEG. Il est possible qu'un décalage entre les échelles de classification spectrale et spectro-photométrique conduise à des valeurs de différence de classe alternativement positives et négatives. Une véritable interprétation me semble cependant difficile sans avoir recours à des simulations, illustrant la complexité des divers biais intervenant dans une classification spectrale.

4.3 Effets dus à l'orientation des fentes

Nous avons vu dans la Sect. 2.4 que les effets de réfraction différentielle peuvent expliquer que les couleurs synthétiques calculées à partir des spectres soient plus rouges que la photométrie *BVR* du relevé. L'on doit aussi prendre en compte les biais d'ouverture résultant de la spectroscopie de fente pour le relevé ESO-Sculpteur. Celle-ci fut obtenue en centrant des fentes longues de 1.2 à 1.8 seconde d'arc de large sur les objets. Comme les fentes échantillonnent une proportion plus faible des parties externes d'une galaxie, on peut s'attendre à ce que les gradients de couleur des galaxies affectent la spectroscopie. Ceux-ci se matérialisent par des couleurs plus bleues de quelques dixièmes de magnitude en allant vers l'extérieur des galaxies (voir aussi Sect. 3.5 de la Partie III), et pour tous les types de galaxies (Segalovitz 1975; Boroson & Thompson 1987; Vigroux et al. 1988; Balcells & Peletier 1994). Cet effet va aussi dans le sens d'un rougissement des spectres de fentes, et par conséquent à une classification plus précoce des spectres par rapport aux distributions d'énergie spectrale intégrées sur tout le profil des objets.

Un effet de second ordre est celui de l'orientation de chaque fente par rapport au grand axe de la galaxie observée. Pour examiner si un tel effet existe dans le relevé ESO-Sculpteur, j'ai utilisé SExtractor et le paramètre "THETAWIN_J2000" pour mesurer l'angle de position du grand axe des ellipses ajustées au profil isophotal des objets, dans les 3 filtres B_J , V_J et R_c du relevé. Les mesures en B_J étant affectées par un niveau de bruit important, je ne les prends pas en compte dans cette analyse. J'ai ensuite comparé cet angle avec l'angle d'orientation des fentes que j'avais stocké dans la base de données, et j'en ai déduit un angle relatif entre le grand axe et la fente compris entre -90° et 90° . Le panneau de gauche de la Fig. 4.5 indique un bon accord entre les mesures d'angle des grands axes pour un même objet dans les filtres V_J et R_c .

La Fig. 4.6 montre pour trois intervalles de la différence entre l'angle de la fente (noté θ_{slit}) et l'angle du grand axe des galaxies (noté PA_{gal}), la fraction de galaxies réparties selon trois intervalles de différence entre le type spectral et le type spectro-photométrique. On montre les résultats dans les filtres R_c et V_J , et pour la moitié brillante et faible de chaque échantillon. Chaque histogramme montré contient entre 70 et 150 galaxies, et les barres d'erreur ne prennent en compte que l'incertitude de Poisson liées à ces nombres d'objets. Par ailleurs, on ne considère dans les graphes que les galaxies ayant un rapport d'axe $b/a \leq 0.9$, car les angles d'orientation des galaxies avec des rapports d'axes proches de l'unité sont affectés par de

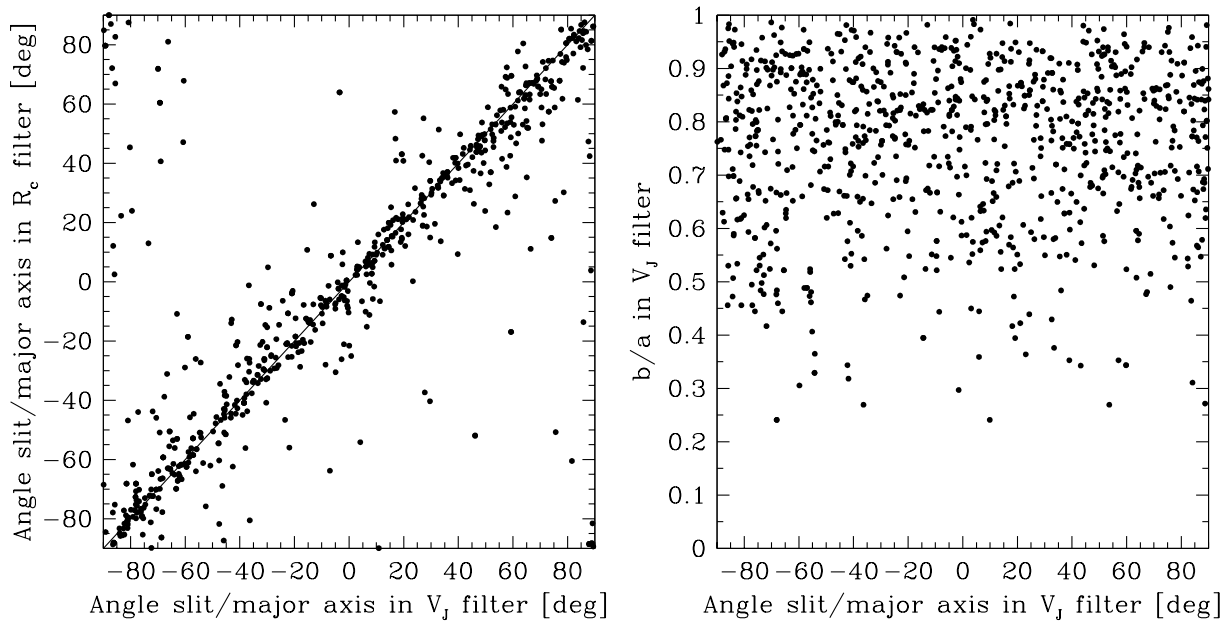


FIG. 4.5 – *A gauche : comparaison des angles relatifs entre le grand axes des galaxies et la fente utilisée pour la spectroscopie. A droite : distribution des rapports d'axes en fonction de l'angle relatifs entre le grand axes des galaxies et la fente utilisée pour la spectroscopie.*

grandes incertitudes, et n'ont pas d'intérêt dans l'analyse effectuée ici. On constate cependant dans le panneau de droite de la Fig. 4.5, qu'un grand éventail de rapports d'axes b/a et d'angles entre la fente et le grand axe des objets sont disponibles pour le relevé ESO-Sculpteur.

On remarque dans les panneaux de gauche de la Fig. 4.6 un effet à 2σ concernant les sous-échantillons de galaxies brillantes, c'est à dire les plus grandes angulairement : les fentes orientées perpendiculairement au grand axe des galaxies observées (à $\pm 30^\circ$) conduisent préférentiellement à un type spectral plus tardif, c'est-à-dire plus bleu, alors qu'il y a un déficit d'objets dans ce même intervalle d'écart de type lorsque les fentes sont alignées avec le grand axe (à $\pm 30^\circ$). J'interprète cet effet comme un résultat lié aux gradients de couleur, mais affectant préférentiellement les galaxies spirales : pour une galaxie spirale inclinée, une fente placée perpendiculairement au grand axe échantillonnera une fraction comparativement plus faible du bulbe et plus grande du disque, qu'une fente alignée avec le grand axe. Le disque étant plus bleu que les bulbes (voir Sect. 3.5 de la Partie II), il en résulte un type spectral plus tardif. On ne peut malheureusement pas examiner l'effet pour les galaxies spirales uniquement, la statistique étant trop faible.

Cet effet est présent dans les deux filtres R_c et V_J (avec un effet plus marqué en R_c), attestant d'un signal réel. En revanche, l'effet n'est pas présent dans les intervalles de magnitude plus faible, et ceci à nouveau dans les deux filtres R_c et V_J . Les galaxies de magnitude $\gtrsim 20 - 21$ sont ainsi trop petites angulairement pour être affectés par ces biais d'ouverture.

Cette analyse fournit une illustration supplémentaire des biais mettant en jeu la cohérence dans la détermination des types spectraux des galaxies lointaines. On montre dans la Sect. 3.4 de la Partie II que selon le mode de séparation par type spectral utilisé, on obtient des fonctions de luminosité variables, et toutes distinctes des fonctions génériques par type morphologique.

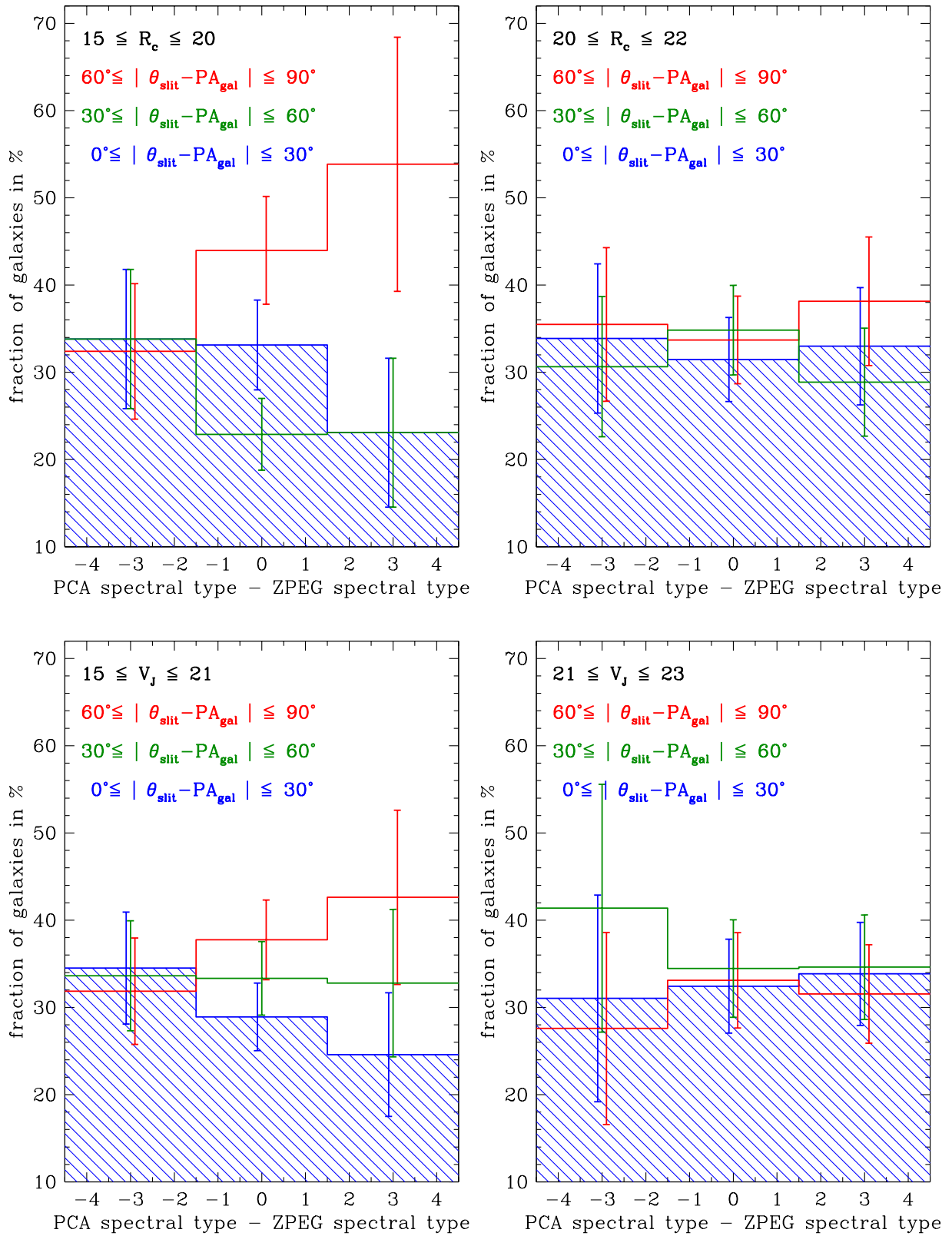


FIG. 4.6 – La fraction des galaxies du relevé ESO-Sculpteur observées en spectroscopie avec différentes orientations de fente (θ_{slit}) relativement au grand axe de l'objet (PA_{gal}), ceci en fonction de la différence entre les types spectraux et spectro-photométrique. En haut, en utilisant les orientations des galaxies dans le filtre R_c en bas, dans le filtre V_J . A gauche on examine environ la moitié des galaxies les plus brillantes de l'échantillon, à droite la moitié la plus faible.

4.4 Détection des fluctuations à très grande échelle

Enfin, nous examinons l’impact des incertitudes dans la mesure des décalages vers le rouge “photométrique” sur la détection des grandes structures telles que la sur-densité discutée dans la Sect. 3.6. Les incertitudes externes sur le décalage spectroscopique pour le relevé ESO-Sculpteur furent évaluées à $\sigma_z = 0.00055$, et correspondent à une incertitude de 2.3 Mpc en distance comobile, qui est en outre comparable à l’épaisseur des feuillets (de Lapparent et al. 1991, les dispersion de vitesse aléatoire dans les feuillets sont également du même ordre de grandeur). Cette bonne précision sur les mesures de z_{spec} permet par conséquent une détection aisée des vides, pour lesquels un diamètre moyen de ~ 33 Mpc fut mesuré par de Lapparent & Slezak (2007) au moyen d’un periodogramme de la distribution des objets le long de la ligne-de-visée. On peut se demander ce qu’il en est lorsqu’on dégrade la précision des décalages vers le rouge selon les valeurs plus importantes obtenues pour les décalage “photométriques” dans la Sect. 4.1.

La Fig. 4.7 montre dans la partie basse, les distributions en ascension droite et décalage spectral pour le relevé ESO-Sculpteur et pour les diverses simulations de photométrie optique synthétique “parfaite” calculées par ZPEG et dispersée comme décrit dans la Sect. 4.1. Dans la Fig. 4.8, on utilise en plus la photométrie infrarouge synthétique “parfaite”. Dans la partie supérieure des deux graphes, on montre pour chaque distribution en ascension droite et décalage spectral de la partie inférieure l’histogramme en décalage spectral avec des incréments de 0.05 (soit ~ 200 Mpc). La distribution des points et l’histogramme en noir des deux figures correspondent aux décalages vers le rouge obtenus par les observations spectroscopiques du relevé et mettent en évidence le pic marqué de la sur-densité dans l’intervalle $0.41 < z < 0.46$.

La distribution des points et l’histogramme en magenta dans les Figs. 4.7 et 4.8 utilisent en revanche les décalages photométriques obtenus lorsqu’on utilise la photométrie optique observée. Dans ce cas, la sur-densité est complètement effacée par l’imprécision sur les décalages $\sigma_z \simeq 0.16$. Elle réapparaît avec l’utilisation de la photométrie optique “parfaite” lorsque la dispersion sur les magnitudes est $\sigma_{\text{mag}} < 0.01$ (points et courbe en vert). On obtient une plus grande robustesse vis-à-vis de l’incertitude sur la photométrie lorsqu’on complémente la photométrie optique avec la photométrie infrarouge. La Fig. 4.8 montre qu’avec $\sigma_{\text{mag}} < 0.05$, la sur-densité est toujours visible, que ce soit dans la distribution des points en ascension droite et décalage vers le rouge que dans l’histogramme (points et courbes en orange); on rappelle que l’imprécision sur les décalages décroît alors à $\sigma_z \simeq 0.05$ (voir Fig. 4.2).

A noter que dans les deux Figs. 4.7 et 4.8, l’existence d’un pic de densité à $z \lesssim 0.3$ dans le relevé spectroscopique est maintenu lorsque la dispersion sur les magnitudes augmente, à cause des dégénérescences dans la détermination des z_{phot} (voir panneau de droite de la Fig. 4.1, et panneau de gauche de la Fig. 4.2). On remarque en outre que l’extension en décalage spectral $\Delta z \simeq 0.5$ des très grandes fluctuations de densité mises en évidence (Sect. 3.6), est supérieure d’au moins un facteur 10 à la précision sur la précision des décalages vers le rouge nécessaires à leur détection : $\sigma_z \simeq 0.007$ avec l’infrarouge proche, et $\sigma_z \simeq 0.07$ avec l’optique uniquement, résultant d’une dispersion en magnitude $\sigma_{\text{mag}} = 0.05$ et $\sigma_{\text{mag}} = 0.01$ resp. (voir Sect. 4.1). D’où la nécessité des simulations réalistes présentées ci-dessus.

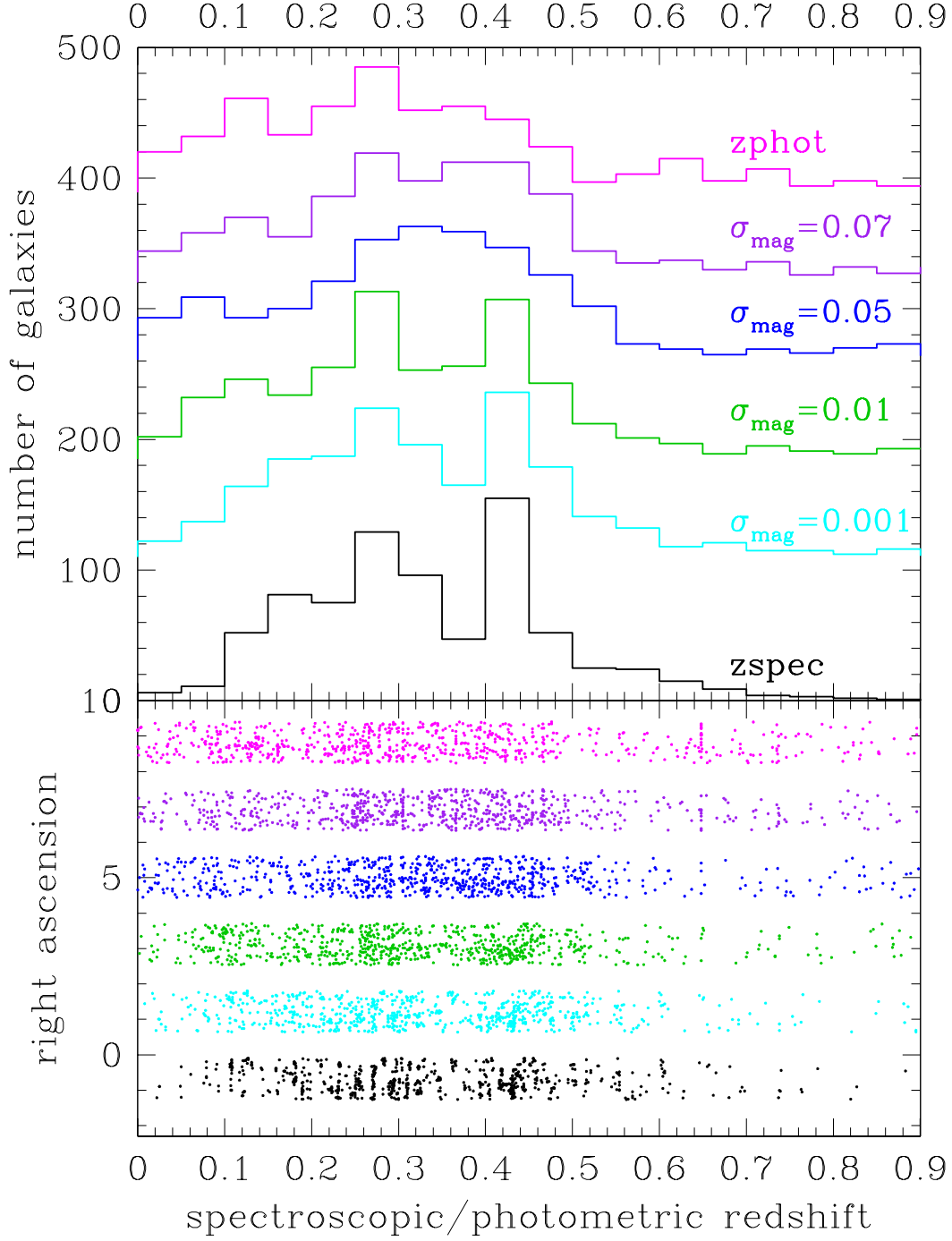


FIG. 4.7 – Cette figure montre en bas la répartition en ascension droite et décalage spectral de différents échantillons de galaxies obtenus à partir du relevé ESO-Sculpteur, en haut, les histogrammes des distributions en décalage spectral correspondants. La distribution en noir est celle observée dans le relevé spectroscopique ESO-Sculpteur. La distribution du haut (en magenta) est celle des décalages photométriques déduits de la photométrie optique du relevé. Les autres courbes sont obtenues en introduisant dans la photométrie optique synthétique “parfaite” (déduite par ZPEG en utilisant les décalages spectroscopiques) une dispersion Gaussienne des magnitudes d’écart-type σ_{mag} .

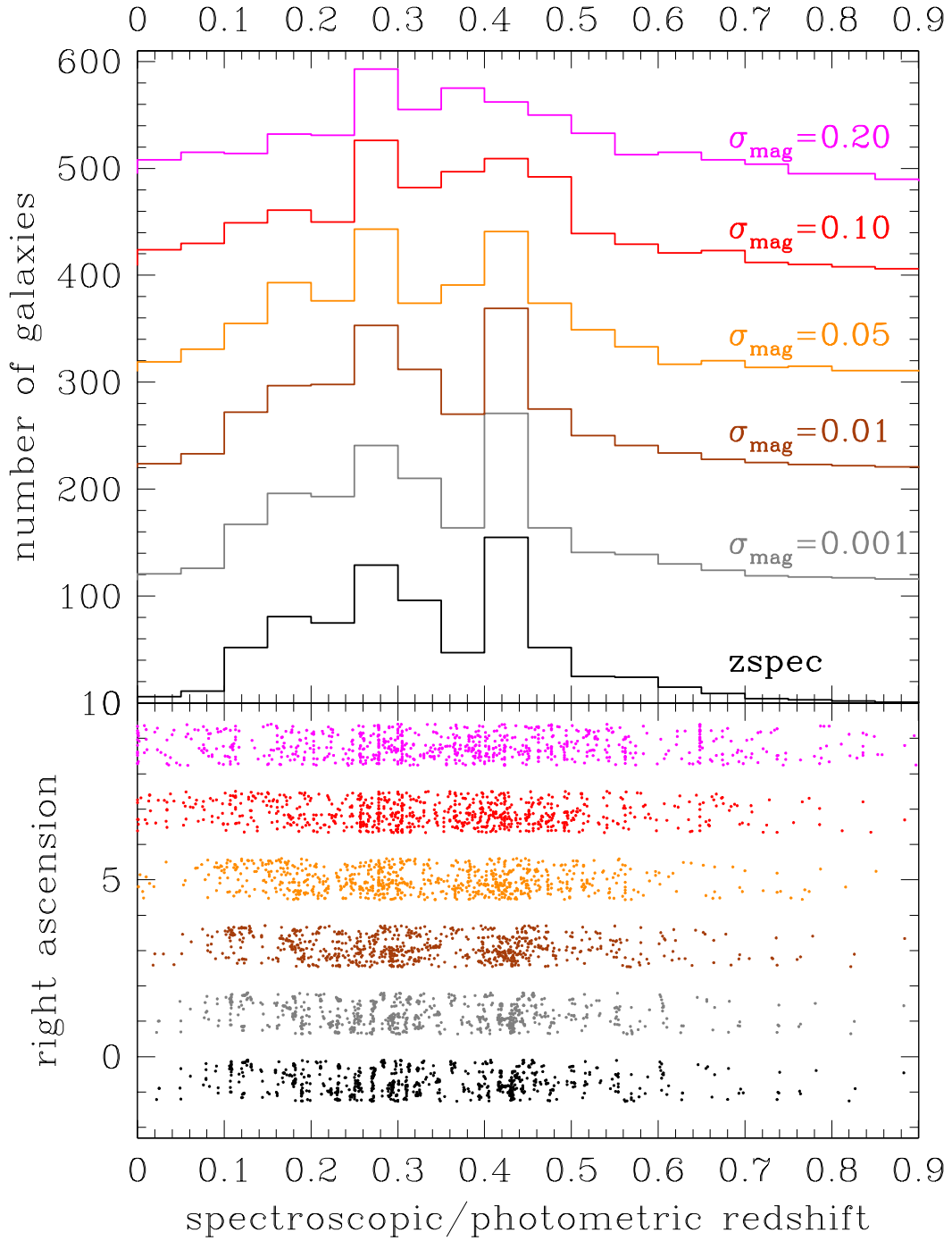


FIG. 4.8 – Même chose que dans la Fig. 4.7, en utilisant la photométrie optique et infrarouge synthétique “parfaite” pour les distributions autre qu’en noir. Une dispersion Gaussienne est introduite dans les magnitudes optiques et infrarouge d’écart-type σ_{mag} .

Chapitre 5

Fonctions de luminosité et évolution

5.1 Introduction

Dans les modèles de formation de l'Univers à grande échelle basés sur l'effondrement gravitationnel des structures, les fonctions de luminosité des galaxies offrent un outil quantitatif pour contraindre les processus majeurs entrant en jeu dans la formation des galaxies (Cole et al. 2000; Baugh et al. 2002). La fonction de masse des galaxies est une prédiction de base des modèles théoriques et contraint la fonction de luminosité moyennant des hypothèses sur le rapport masse-luminosité des galaxies (Ashman et al. 1993). Les phénomènes de refroidissement et d'éjection du gaz jouent aussi un rôle dans la prédiction théorique des fonctions de luminosité (Scannapieco & Broadhurst 2001). Les fonctions de luminosité permettent en outre de contraindre la formation d'étoiles et sa régulation (Perez-Gonzalez et al. 2003; Peng et al. 2010), ainsi que les processus de fusions des galaxies (Wake et al. 2006).

Si les simulations à N-corps décrivent un intervalle limité de mass et de types de galaxies, les observations révèlent une grande richesse de détails, avec une fonction de luminosité des galaxies s'étendant sur 12 magnitudes, soit 5 ordres de grandeur en luminosité (Mathis et al. 2002; Flint et al. 2001; Trentham & Tully 2002). Les relevés systématiques de galaxies indiquent un comportement en loi de Schechter (1976) pour la plupart des mesures, avec des variations de la magnitude caractéristique et de la pente aux faibles magnitudes selon le type de galaxies considérées (Efsthathiou et al. 1988; Loveday et al. 1992; Heyl et al. 1997; Lin et al. 1999; Folkes et al. 1999; Fried et al. 2001; Madgwick et al. 2002; Wolf et al. 2003; Montero-Dorta & Prada 2009).

Pourtant, les mesures locales des fonctions de luminosité dans l'amas de la Vierge, du Centaure, du Fornax et de Coma (Sandage et al. 1985; Jerjen & Tammann 1997a; Ferguson & Sandage 1991; Andreon 1998), ont montré un comportement distinct pour les différents types morphologiques de galaxies, avec des fonctions Gaussiennes pour les galaxies géantes, et des fonctions croissantes à faibles magnitudes pour les galaxies naines. Des modèles théoriques peuvent prédire ce comportement bimodal (Schaeffer & Silk 1988). Les variations de la fonction globale peuvent alors être attribués à des variations dans le rapport du nombre de galaxies géantes et naines, mais des échantillons statistiques couvrant de grands volumes du l'Univers, et non pas concentrés sur un groupe ou amas particulier sont nécessaires, avec de surcroît une mesure fiable des types morphologiques des différents objets.

5.2 Collaborateurs

- Stéphane Arnouts (alors doctorant IAP; actuellement au TCFH, en détachement du Lab. d’Astrophysique de Marseille),
- Sandro Bardelli (Obs. de Bologne, Italie),
- Gaspar Galaz (alors doctorant IAP; actuellement maître de conférences à l’Univ. Pontificia Católica, Chili),

5.3 Fonctions de luminosité par classe spectrale

Article: “The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts 0.1-0.5”, de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S., 2003, *A&A* 404, pp. 831-860.

Grâce à la classification spectrale objective des galaxies du relevé ESO-Sculpteur, nous avons pu mesurer les fonctions de luminosité par type spectral (de Lapparent et al. 2003). Le catalogue est scindé en 3 classes spectrales, correspondant aux 3 regroupements de types morphologiques suivants: E + S0 + Sa, Sb + Sc + dE, Sc + Sd/Sm + dI. Ainsi, les galaxies géantes (elliptiques, lenticulaires, et spirales) occupent les 3 classes spectrales, tandis que les deux types de galaxies naines (dE, dI), mises en évidence pour la première fois dans un relevé systématique à $z \sim 0.5$, sont réparties entre les deux classes spectrales dominées par les galaxies spirales “tardives”.

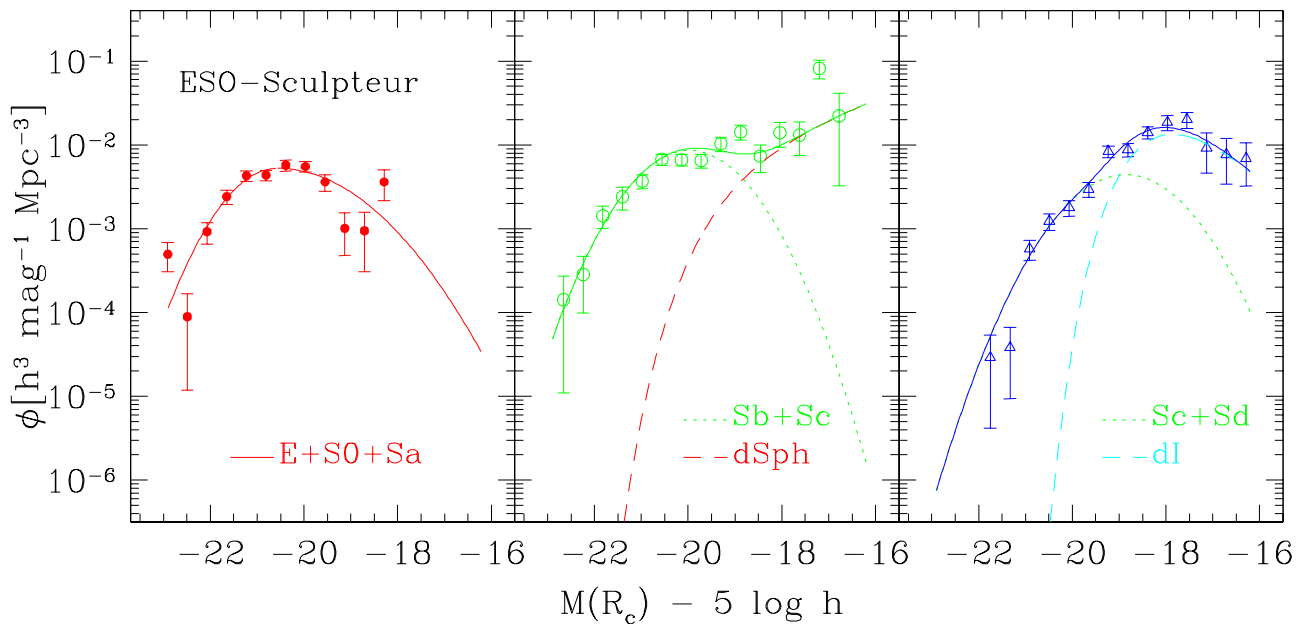


FIG. 5.1 – Les fonctions de luminosité par classe spectrale du relevé ESO-Sculpteur à $R_c \leq 21.5$ et $0.1 < z < 0.6$ (symboles) sont ajustées au moyen de fonctions composites (lignes continues) basées sur les fonctions de luminosité spécifiques à chaque type de galaxie.

Les fonctions de luminosité des 3 classes spectrales, montrées dans la Fig. 5.1, diffèrent significativement les unes des autres, et nous proposons une nouvelle approche pour interpréter ces résultats. Nous montrons que l’on peut obtenir de bons ajustements des fonctions de luminosité du relevé ESO-Sculpteur par classe spectrale au moyen de sommes de fonctions Gaussiennes pour les galaxies géantes, et de fonctions de de Schechter (1976) pour les galaxies naines (décroissance exponentielle aux magnitudes brillantes, et croissance en loi de puissance aux faibles luminosités). Ces ajustements, montrés dans la Fig. 5.1, conduisent à une réconciliation avec les fonctions de luminosité spécifiques à chaque type

morphologique mesurées dans l'Univers local, indiquées dans la Fig. 5.2. De surcroît, les paramètres des composantes géantes et naines des fonctions de luminosité du relevé ESO-Sculpteur sont en bon accord avec les mesures locales pour chaque type de galaxie (Sandage et al. 1985; Jerjen & Tammann 1997a; Ferguson & Sandage 1991).

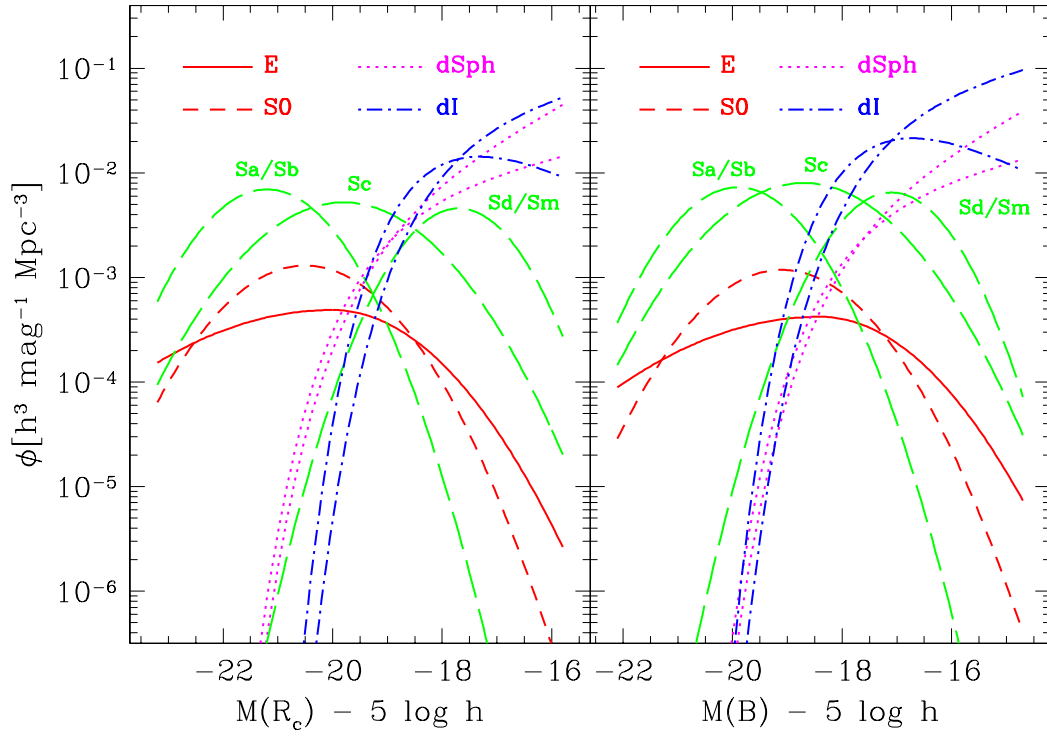


FIG. 5.2 – Les fonctions de luminosité par type morphologique (Sandage et al. 1985; Jerjen & Tammann 1997b) converties dans les bandes B et R_c , avec recalage des amplitudes sur le relevé ESO-Sculpteur. Ces courbes illustrent les contributions relatives de chaque classe morphologique à la fonction de luminosité des galaxies.

5.4 Article choisi n° 4

“The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts 0.1-0.5”

de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 404, pp. 831-860

2003

5.5 Biais dans les fonctions de luminosité par type

Article: “Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift surveys” de Lapparent, V., 2003, *A&A* 408, pp. 845-872.

Afin de replacer dans un contexte plus large les nouvelles mesures de fonctions de luminosité que nous avons obtenues avec le relevé ESO-Sculpteur, j’ai effectué une revue exhaustive de toutes les mesures de fonctions de luminosité par classe de galaxie obtenues dans les relevés avec connaissance des décalages vers le rouge (de Lapparent 2003). Ces fonctions sont toutes de type Schechter, avec des magnitudes caractéristiques et des pentes variables selon les relevés et le mode de sélection par type. Par comparaison avec les fonctions de luminosité spécifiques à chaque type morphologique mesurées localement (voir Fig. 5.2), cette analyse suggère qu’une grande partie des mesures de fonctions de luminosité sont affectées par un mélange de types morphologiques. Cette confusion gêne la comparaison des fonctions de luminosité entre les différents relevés.

Fait notable, aucun relevé existant ne mesure la fonction de luminosité des galaxies spirales : ces mesures sont suspectées d’être contaminées par la présence de galaxies naines elliptiques (voir Sect. 5.3); nous confirmons cette présomption dans la Sect. 3.4 au moyen du catalogue morphologique EFIGI). En outre, la plupart des relevés utilisant une identification visuelle de la morphologie des objets à partir de plaques photographiques échouent dans la mesure des fonctions de luminosité Gaussiennes pour les galaxies elliptiques et lenticulaires. Cette analyse souligne la nécessité de mesures séparées des fonctions de luminosité des différents types de galaxies géantes et naines au delà de l’Univers local, et pour de grands échantillons statistiques. L’échantillon EFIGI, décrit dans le deuxième volet de ce mémoire, fournit un premier échantillon permettant de telles mesures (voir Sect. 3.4).

5.6 Article choisi n° 5

“Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift surveys”

de Lapparent, V.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 408, pp. 845-872

2003

5.7 Evolution des galaxies spirales tardives

Article: “The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1-0.”, de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S. 2004, *A&A* 422, pp. 841–863.

Le relevé ESO-Sculpteur a ensuite permis de préciser la nature de l’excès de galaxies dans les comptages profonds de galaxies, et plus particulièrement dans les bandes bleues (Tyson 1988; Lilly et al. 1991; Metcalfe et al. 1995; Campos & Shanks 1997). Ces nouvelles données exhibent une croissance rapide de la densité spatiale de galaxies Sc + Sd + dI avec le décalage spectral, montrée dans le panneau de gauche de la Fig. 5.3 (de Lapparent et al. 2004), que l’on peut modéliser en $(1+z)^2$. Cette mesure fut validée par les 2 excellentes prédictions qui en résultent : (1) l’ajustement des distributions en décalage vers le rouge du relevé ESO-Sculpteur jusqu’à $z \simeq 0.5$, dans le panneau de droite de la Fig. 5.3 ; (2) l’ajustement des comptages BVR_c extrapolés jusqu’à la limite du catalogue photométrique de l’ESO-Sculpteur, 3 magnitudes plus profond que le sondage spectroscopique, soit jusqu’à $z \simeq 1.0$, montré dans la Fig. 5.4.

L’évolution détectée pourrait être causée par une croissance rapide du nombre de galaxies lorsque le décalage spectral augmente, ce qui indiquerait que les fusions de galaxies ont joué un rôle dans l’évolution récente des galaxies de type spiral tardif et naine irrégulière. Une autre interprétation possible est une augmentation de luminosité de l’ordre de ~ 1 magnitude à $z \sim 0.5$ et de $\sim 1.5 - 2.0$ à $z \sim 1$. Cette dernière interprétation est compatible avec l’accroissement de luminosité prédit par les modèles d’évolution spectro-photométrique des galaxies Sc aux décalages considérés (Poggianti 1997). Enfin, la combinaison d’une évolution en nombre *et* en luminosité ne peut pas être écartée.

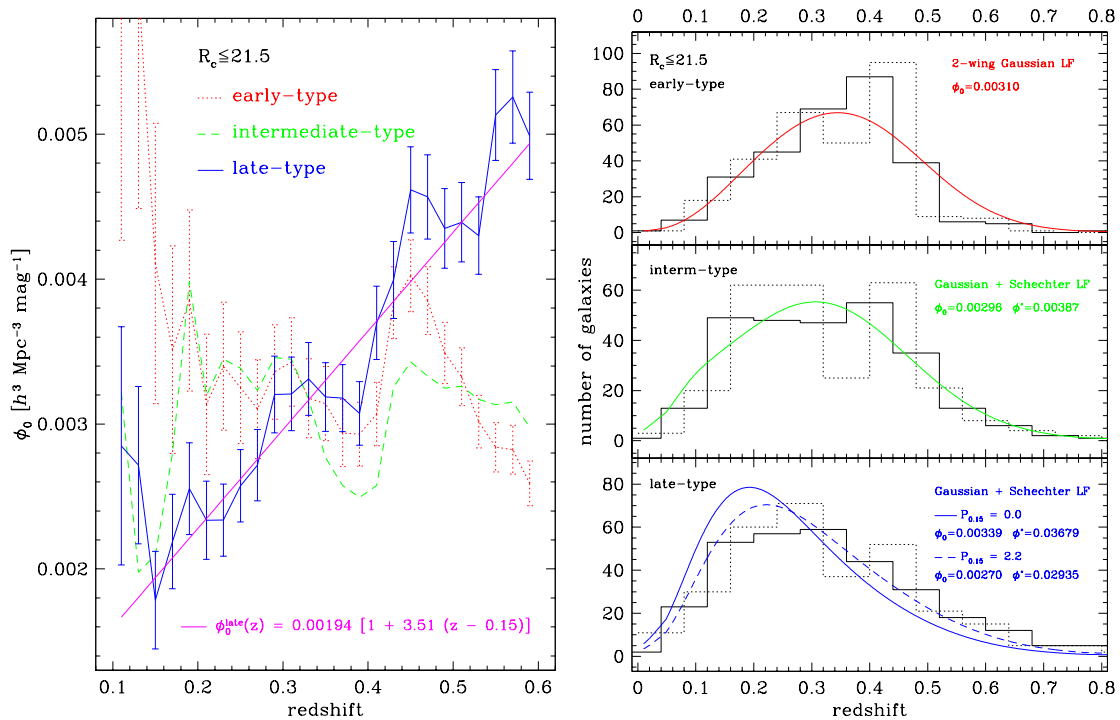


FIG. 5.3 – A gauche, la croissance rapide de la densité de galaxies de type spectral tardif (Sc + Sd/Sm + dI) dans le relevé ESO-Sculpteur. A droite, l’ajustement des distributions en décalage spectral dans la bande R_c pour les 3 classes spectrales (type précoce [E, S0, Sa], type intermédiaire [Sb, Sc, dE], et type tardif [Sc, Sd/Sm, dI]), par les fonctions de luminosité composites de la Fig. 5.1 (sans évolution, lignes continues), et avec prise en compte de l’évolution des galaxies de type tardif (ligne pointillée).

Cette analyse illustre l’importance d’utiliser des fonctions de luminosité réalistes pour chaque type de galaxie lorsque l’on souhaite mesurer leur évolution. Nous avons constaté que l’utilisation de fonctions

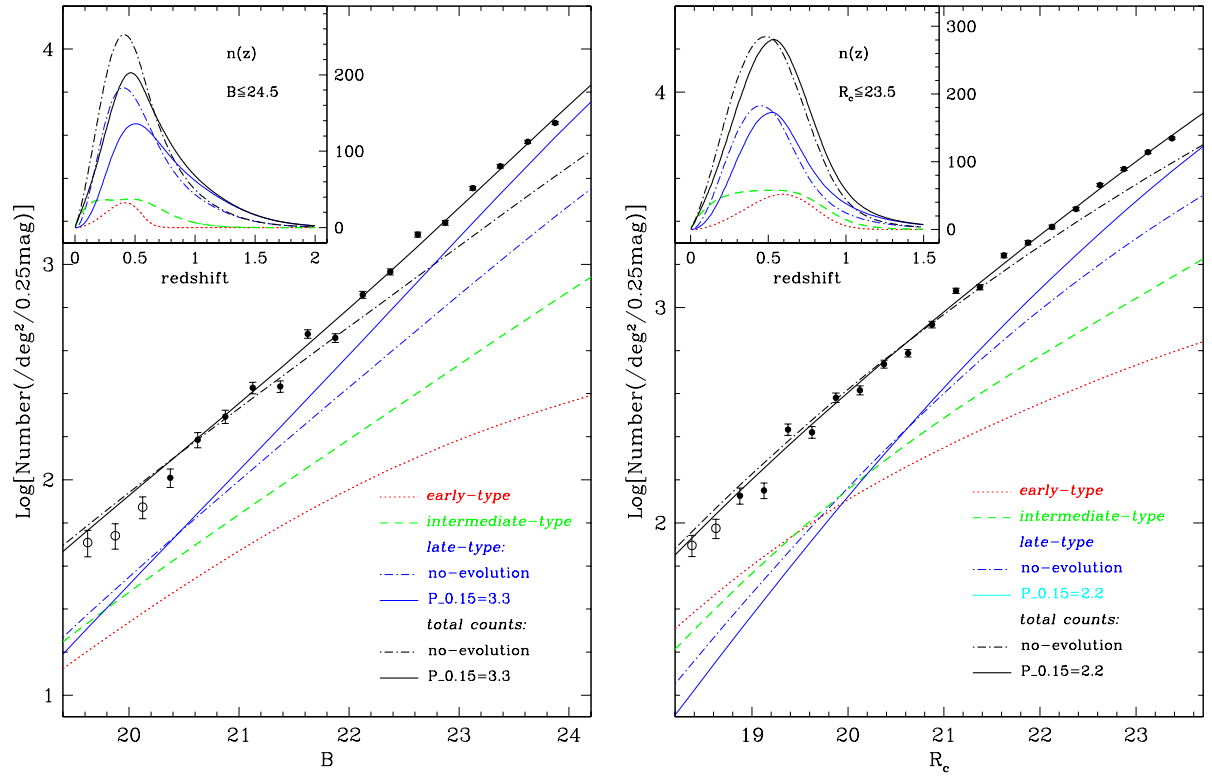


FIG. 5.4 – Ajustement des comptages du relevé ESO-Sculpteur dans les bandes B (à gauche) et R_c (à droite) par les fonctions de luminosité composites de la Fig. 5.1 (sans évolution, lignes tiretées/pointillées), et avec prise en compte de l'évolution des galaxies de type tardif (lignes continues).

de luminosité de Schechter obtenus pour les classes spectrales, rendent difficile l'ajustement simultané des distributions en redshifts et des comptages profonds, et l'évolution qui en est déduite est affectée par de plus grandes dégénérescences et barres d'erreur.

5.8 Article choisi n° 6

“The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1-0.”

de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S.

Astronomy & Astrophysics, Vol. 422, pp. 841–863

2004

Chapitre 6

Suivi en infrarouge-moyen avec ISO

6.1 Introduction

L’observation des galaxies dans l’infrarouge offre une opportunité unique d’étudier le processus de formation d’étoiles via le chauffage des poussières (Sanders & Mirabel 1996). Ces dernières étant le résultat des éjections stellaires, l’infrarouge fournit un diagnostic complémentaire, celui de la formation d’étoiles passée. Des preuves d’une évolution marquée furent fournies par des observations dans l’infrarouge moyen avec le satellite *ISO* (Pozzi et al. 2004), puis avec *Spitzer* (Papovich et al. 2004; Dole et al. 2004; Le Floc’h et al. 2005; Rodighiero et al. 2010). L’extension à l’infrarouge lointain et au domaine sub-millimétrique suggère une évolution rapide des sources infrarouges entre $z = 0$ et $z \simeq 1$ (Lagache et al. 2003; Magnelli et al. 2009), et l’existence d’une population de galaxies très lumineuses avec un pic d’activité à $z \simeq 2$ (Franceschini et al. 2010). La modélisation des flux et des distributions de comptages dans les différentes bandes apportent des informations sur la nature des sources et leur mode d’évolution (Xu et al. 2001; Sajina et al. 2006; Popescu et al. 2011). Les mesure du rayonnement de fond dans l’infrarouge apportent de surcroît des contraintes fortes sur l’histoire de la formation d’étoiles des galaxies émettant dans l’infrarouge (Lagache et al. 2005; Le Borgne et al. 2009; Jauzac et al. 2011). Les observations récentes dans l’infrarouge lointain avec le satellite *Herschel* apportent de nouvelles contraintes sur l’évolution des sources produisant le fond diffus (Berta et al. 2010).

6.2 Collaborateurs

- Brigitte Rocca-Volmerange (IAP)
- Nick Seymour (post-doctorant à l’IAP au moment de la collaboration, actuellement au Mullard Space Science Laboratory, Univ. College London, Royaume-Uni)
- Michel Fioc (IAP)

6.3 Catalogue à $12\mu\text{m}$

Article: “A $12\mu\text{m}$ ISOCAM survey of the ESO-Sculptor field. Data reduction and analysis”, Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent**, V., 2007, *A&A* 475, pp. 791-799.

Par son taux de complétude élevé et la séparation fine des différents types de galaxies, le relevé ESO-Sculpteur constitue une base de donnée intéressante pour des suivis observationnels dans d’autres domaines de longueur d’onde. Nous avons observé avec *ISOCAM* la région du champ ESO-Sculpteur la moins affectée par les cirrus galactiques, avec le filtre LW10 qui couvre la bande passante $\simeq 12\pm 3.5\mu\text{m}$, et fut conçu pour mimer la bande à $12\mu\text{m}$ d’*IRAS*. Nos observations ont une profondeur ($\sim 80\%$ de complétude à $\sim 0.7\text{ mJy}$) et une surface ($\sim 680\text{ min. d’arc carré}$) comparable aux champs “Lockman

Deep” et “Marano Deep” observés à $15\mu\text{m}$ dans le cadre du temps garanti consacré aux relevés extra-galactiques (Elbaz et al. 1999). Ces observations offrent un complément spécifique aux autres relevés par l’utilisation du filtre LW10. Nous avons ajouté à l’ensemble de ces données les magnitudes infrarouge proche extraites des relevés 2MASS (J,H,K) and DENIS (I).

Les observations *ISOCAM* produisent un catalogue de 142 sources avec un flux intégré supérieur à 0.31 mJy à un niveau de détection équivalent à 5-sigma (Seymour et al. 2007). 20 étoiles ont été identifiées en utilisant les couleurs infrarouge proche/infrarouge moyen. Par l’ajustement de modèles de spectres stellaires (incluant les modèles de Kurucz 1992) aux flux dans l’optique (USNO) et l’infrarouge proche (DENIS, 2MASS) de ces étoiles, nous avons pu prédire leurs flux dans le filtre IRAS à $12\mu\text{m}$ au moyen des relations de couleur infrarouge moyen/optique du catalogue *IRAS*, que nous avons convertis en flux dans le filtre *ISOCAM* à $12\mu\text{m}$. La comparaison entre les magnitudes observées par *ISOCAM* et celles prédites nous fournit une calibration absolue que nous appliquons ensuite à l’ensemble de notre catalogue (Seymour et al. 2007).

Parmi les 120 galaxies détectées à $12\mu\text{m}$, 105 sont présentes dans le relevé ESO-Sculpteur optique. Ce catalogue de 120 galaxies est complet jusqu’à une densité de flux de 1.29 mJy , et nous corrigeons de l’incomplétude jusqu’à 0.31 mJy par 2 méthodes indépendantes, basées respectivement sur les étoiles et sur les contreparties optiques des sources faibles. Les corrections d’incomplétude obtenues sont similaires (Seymour et al. 2007). Les Figs. 6.1 et 6.2 montrent la répartition en flux des sources, et leur distribution sur le ciel.

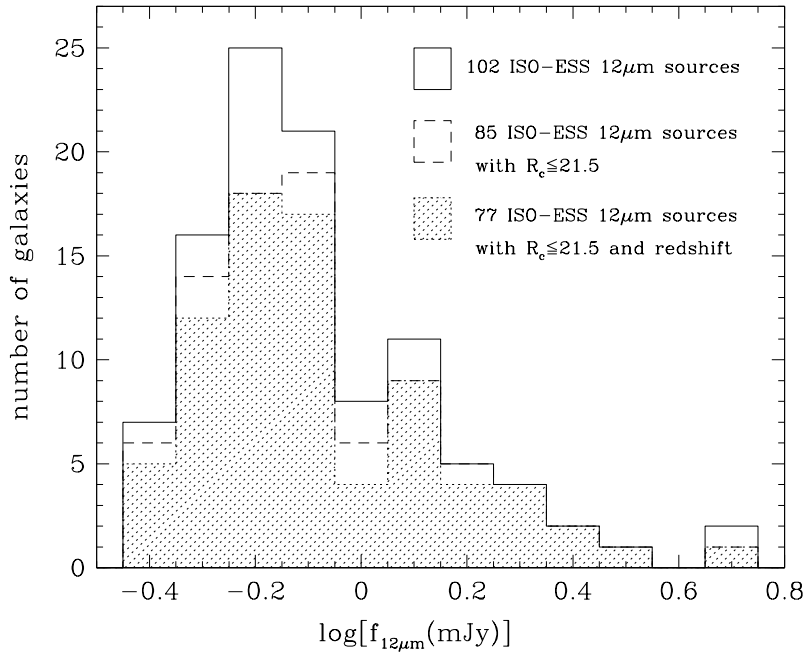


FIG. 6.1 – La distribution en flux des 102 galaxies détectées à $12\mu\text{m}$ avec *ISOCAM* dans la région explorée du relevé ESO Sculpteur. La ligne pointillée indique les 85 sources avec contre-parties optiques dans la limite $R_c \leq 21.5$, et la région hachurées les 77 sources ayant de surcroît une mesure de décalage spectral. La limite de complétude de 1.29 mJy correspond à $\log[f_{12\mu\text{m}}] = -0.11$, et les comptages sont corrigés de l’incomplétude jusqu’à $\log[f_{12\mu\text{m}}] = -0.51$.

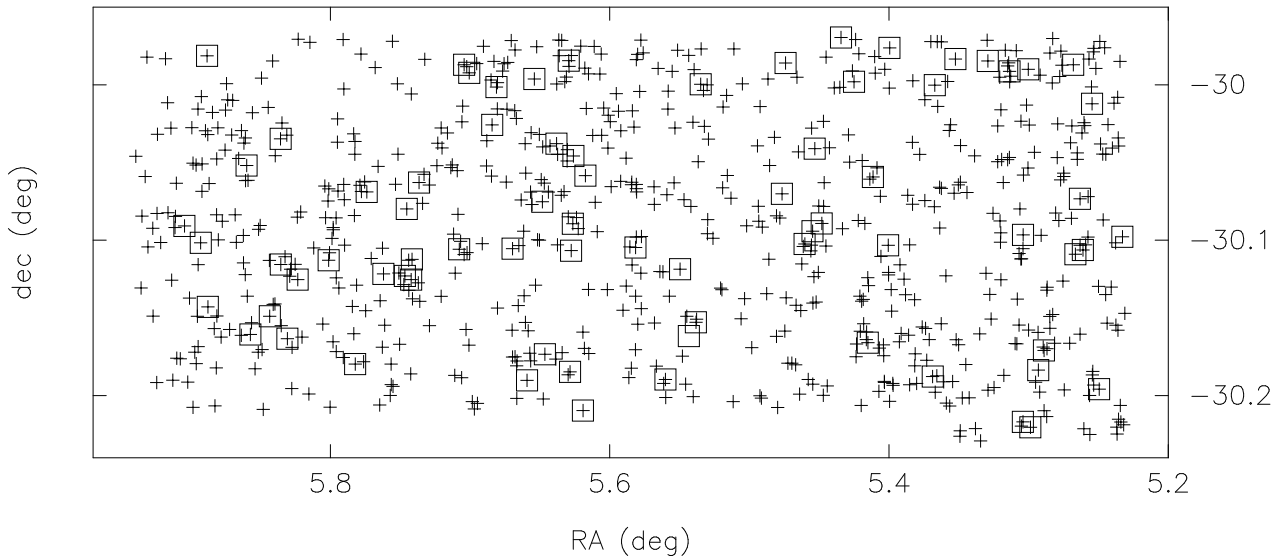


FIG. 6.2 – La distribution sur le ciel des 74 sources à $12\mu\text{m}$ détectées avec ISOCAM (carrés) parmi les 409 galaxies avec $R_c \leq 20.5$ du relevé ESO-Sculpteur (plus), dans la région commune des deux relevés.

6.4 Modélisation des comptages à $12\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$

Article: “The $12\mu\text{m}$ ISO-ESO-Sculptor and $24\mu\text{m}$ Spitzer faint counts reveal a population of ULIRGs as dusty massive ellipticals. Evolution by types and cosmic star formation”, Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., 2007, *A&A* 475, pp. 801-812.

Le suivi à $12\mu\text{m}$ du catalogue ESO-Sculpteur produit des comptages de galaxies intégrés et différentiels par intervalle de magnitude qui sont en bon accord avec ceux des autres relevés extragalactiques à $15\mu\text{m}$, obtenus également avec ISOCAM: un comportement Euclidien aux grands flux, puis un excès marqué aux faibles flux, entre 0.1 et 1 mJy, comme le montre la Fig. 6.3 (Rocca-Volmerange et al. 2007).

Comme les échelles de temps caractéristiques de l’émission des étoiles et de la poussière sont différentes, les comptages dans l’infrarouge moyen sont a priori distincts des comptages optiques. Une interprétation cohérente doit décrire simultanément les deux types d’émission. Dans ce but, nous modélisons les comptages ISOCAM du champ ESO-Sculpteur au moyen du code de synthèse évolutive PÉGASE.3 (“Projet d’Etude des GALaxies par Synthèse Evolutive” ; Fioc et al. 2011). Cette version du modèle d’évolution spectro-photométrique PÉGASE développé à l’IAP (www.iap.fr/pegase) permet de décrire simultanément l’émission des étoiles et de la poussière, caractérisées par des échelles de temps et des domaines de longueur d’onde différents. Dans ce modèle, chaque type de galaxie est défini par un scénario spécifique de transformation du gaz en étoiles, calibré à $z = 0$ sur les spectres observés dans l’Univers local (Rocca-Volmerange & Guiderdoni 1988). Ce modèle permet de prédire les distributions spectrales d’énergie depuis l’UV jusqu’à l’infrarouge lointain. Nous utilisons les différents types de galaxies normales ainsi que les fractions par type provenant du bon ajustement des comptages profonds dans l’optique et l’infrarouge proche (bandes UBVR_IK) effectués avec PÉGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1999).

La modélisation avec PÉGASE.3 montre que les populations de galaxies normales ne permettent pas d’expliquer l’excès dans les comptages infrarouge moyen, et confirme la contribution négligeable des galaxies elliptiques normales à $z \leq 4$, car à ce stade d’évolution des scénarios, elles ont expulsé tout leur gaz et leur poussière. Cependant, en ajoutant une petite population de galaxies elliptiques sur-lumineuses dans l’infrarouge moyen, nous obtenons un bon ajustement des comptages ISOCAM à $12\mu\text{m}$ (Rocca-Volmerange et al. 2007). Ces galaxies sur-lumineuses sont massives et poussiéreuses, et sont interprétées comme des ULIRGs (“Ultra Luminous Infrared Galaxies”) qui présenteraient des similarités avec les galaxies hôtes de radio-galaxies. Le même modèle ajuste de surcroît les comptages à $24\mu\text{m}$ obtenus avec

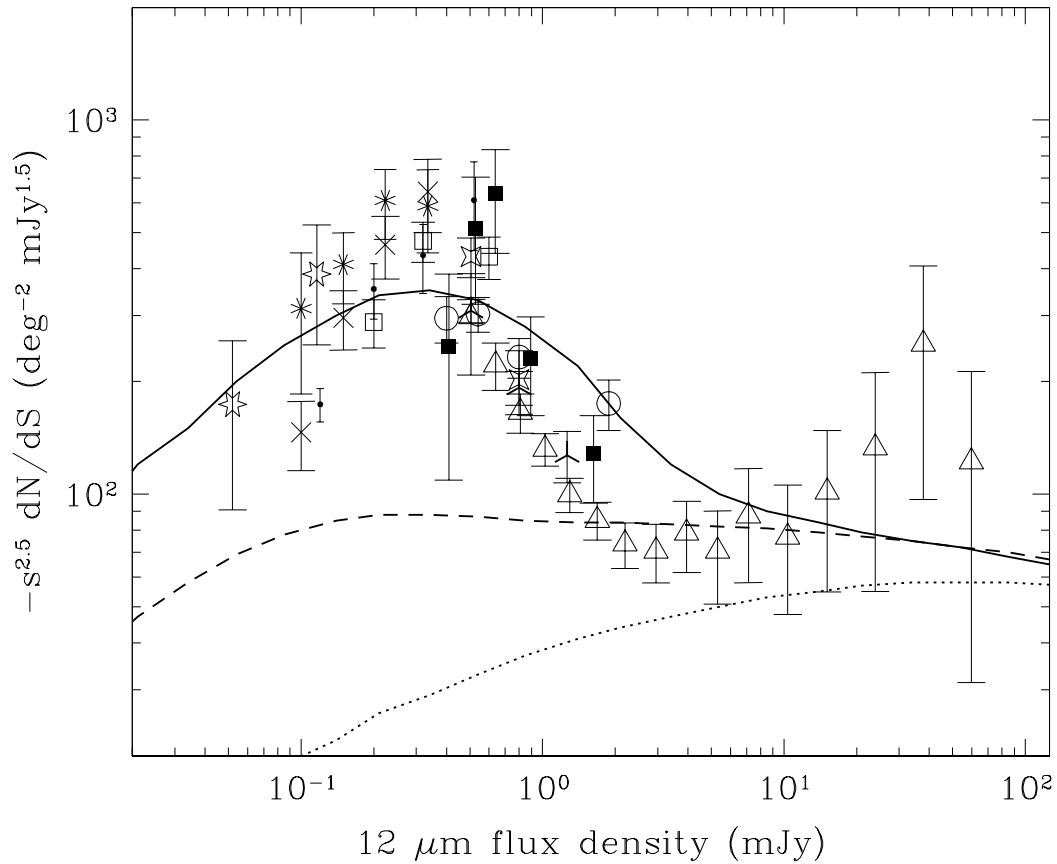


FIG. 6.3 – Les comptages différentiels du relevé ESO-Sculpteur obtenus à $12\mu\text{m}$ avec ISOCAM (carrés pleins), comparés aux autres comptages obtenus avec ISOCAM à $15\mu\text{m}$. Les comptages sont normalisés à un Univers Euclidien. La courbe en trait plein montre la prédiction avec PÉGASE.3 en incluant la population d’ULIRG évoluant selon un scénario de galaxies elliptiques. La courbe tiretée prend en compte les corrections- k mais ignore l’évolution ; la courbe pointillée correspond à l’effet d’expansion de l’Univers uniquement (corrections- k et évolution ignorées).

Spitzer (Papovich et al. 2004), en utilisant les mêmes paramètres de modélisation (Rocca-Volmerange et al. 2007).

Nous parvenons ainsi à modéliser avec PÉGASE.3 l’évolution des comptages infrarouge moyen avec un modèle en quelque sorte “minimal” : sans introduire d’évolution intrinsèque du nombre de galaxies, comme pourraient l’induire des coalescences fréquentes de galaxies ou la formation récente de nouvelles galaxies, et sans évolution en luminosité qui resulterait d’une augmentation soudaine et massive du taux de formation d’étoiles à $z \simeq 2-3$. Dans cet intervalle de décalage vers le rouge, parmi les galaxies PÉGASE.3, seules celles de type spirale précoce (Sa) montrent une augmentation de leur taux de formation d’étoiles, mais qui n’est pas suffisante pour expliquer l’excès des comptages dans l’infrarouge moyen.

6.5 Propriétés des sources à $12\mu\text{m}$

Sur les 120 galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$, 77 ont des mesures de type spectral et de décalage vers le rouge obtenus dans l’optique. Afin de mieux comprendre la nature des galaxies causant l’excès dans les comptages, nous avons calculé leur distribution en luminosité absolue à $12\mu\text{m}$. Les flux mesurés sont convertis au moyen des corrections k calculées avec PÉGASE.3, en utilisant pour

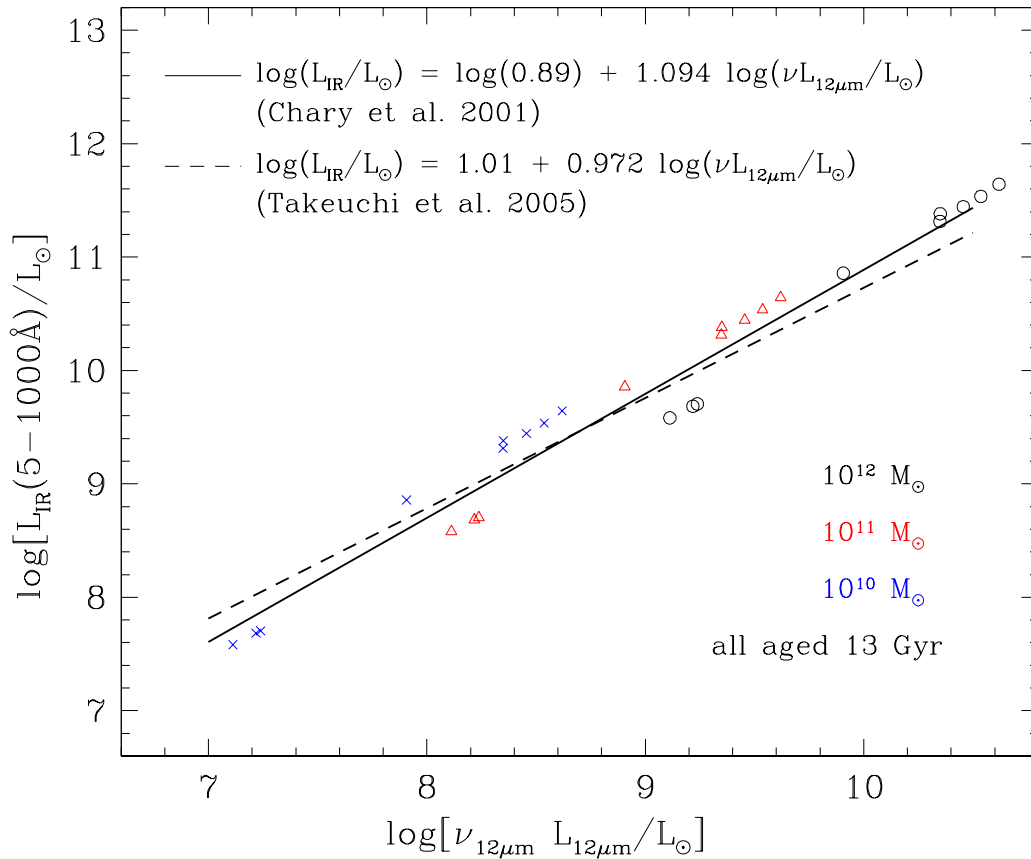


FIG. 6.4 – La relation entre la luminosité infrarouge totale $L(5 - 1000)\mu\text{m}$ et la luminosité monochromatique à $12\mu\text{m}$ prédite par les spectres des modèles PÉGASE.3 âgés de 13 milliards d'années, pour 3 valeurs de la masse stellaire: $10^{10} M_{\odot}$, $10^{11} M_{\odot}$, et $10^{12} M_{\odot}$. Les ajustements obtenus par Chary & Elbaz (2001) et Takeuchi et al. (2005) sont indiqués.

chaque spectre observé le modèle de même type spectral. Les luminosités infrarouges totales (intégrées de 5 à $1000\mu\text{m}$) sont déduites en utilisant les rapports aux luminosités à $12\mu\text{m}$ prédits par PÉGASE.3 pour chaque type de galaxie. Ces calculs sont l'occasion de montrer que la corrélation observée entre la luminosité infrarouge à $12\mu\text{m}$ et la luminosité infrarouge totale des galaxies (Chary & Elbaz 2001; Elbaz et al. 2002; Takeuchi et al. 2005) est bien reproduite avec PÉGASE.3, et qu'elle résulte de la séquence des différents types de galaxies à différentes masses, comme indiqué dans la Fig. 6.4.

Appliquée aux galaxies détectées à $12\mu\text{m}$, la classification spectrale optique du relevé ESO-Sculpteur indique que 2/3 des sources ont des spectres de spirales tardives (Sbc, Sc, Sd), et 1/3 des spectres de spirales précoces (Sa, Sb). La répartition des sources à $12\mu\text{m}$ dans le plan des deux paramètres utilisés pour la classification spectrale est montrée dans la Fig. 6.5, et l'on peut constater que plus de la moitié des sources présentent la raie d'émission de [OII] à 3727\AA .

L'examen de la distribution des largeurs équivalentes de la raie de [OII] pour les sources à $12\mu\text{m}$ dans la Fig. 6.6 (panneau de gauche) suggère qu'elles présentent un taux de formation d'étoiles plus important que les galaxies non-émettrices dans l'infrarouge, affectant préférentiellement les galaxies de type spirale précoce (panneau de droite). Ces résultats sont en bon accord avec l'idée que l'émission infrarouge de ces galaxies serait due à des sursauts de formation d'étoiles enfouis dans la poussière (Pozzi et al. 2004; La Franca et al. 2004).

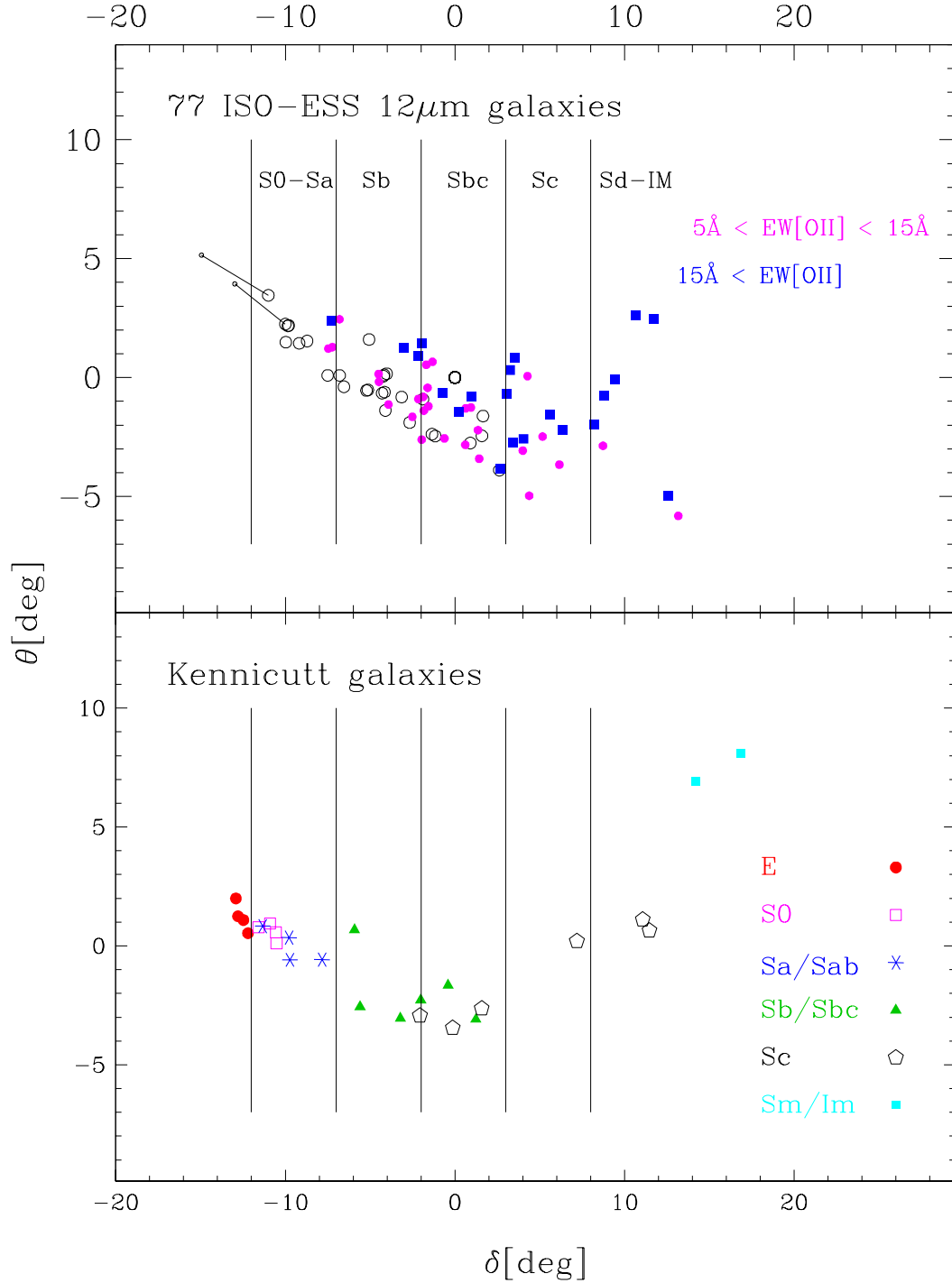


FIG. 6.5 – Dans le panneau du haut, la classification spectrale optique des 77 galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$. Les lignes verticales séparent l'échantillon en types spectraux par référence à la bibliothèque de galaxies de Kennicutt (1992) avec types morphologiques et spectroscopie, montrée dans le panneau du bas. Les galaxies avec une largeur équivalente de la raie en émission de [OII] inférieure ou supérieure à 5\AA , et supérieure à 15\AA sont indiquées avec des symboles différents.

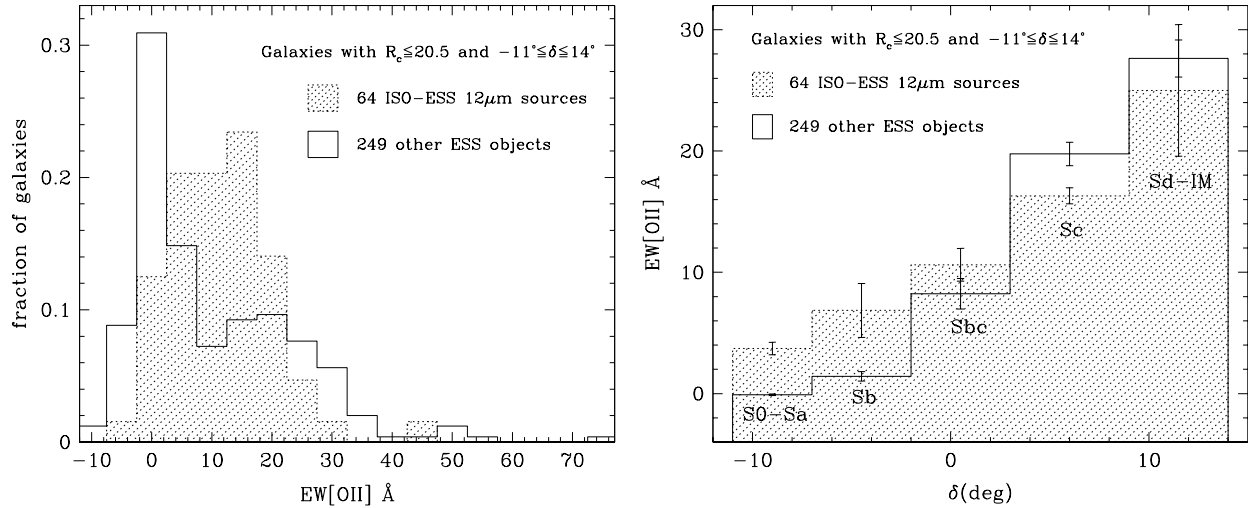


FIG. 6.6 – A gauche, comparaison de la répartition relative des largeurs équivalentes de la raie de [OII] pour les 64 galaxies à $12\mu\text{m}$ (histogramme hachuré) et les 249 galaxies du relevé optique non émettrices à $12\mu\text{m}$. Ce diagramme ne considère que les galaxies dont l'intervalle spectral contient la raie de [OII]. Les deux échantillons sont limités à $R_c \leq 20.5$ et à $-11^\circ \leq \delta \leq 14^\circ$ (voir Fig. 6.5). A droite, les médianes des largeurs de la raie de [OII] par intervalle de type spectral, comme défini dans la Fig. 6.5.

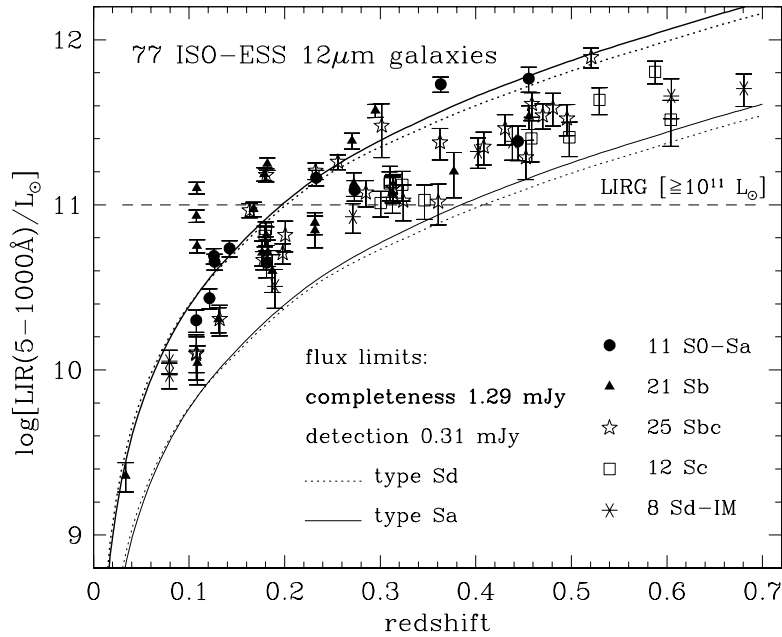


FIG. 6.7 – La distribution de la luminosité infrarouge totale pour les 77 sources ISO-ESO-Sculpteur ayant un décalage spectral. Les corrections-k des différents types spectraux indiquées proviennent des modèles spectro-photométriques correspondants de PEGASE.3.

La Fig. 6.7 montre que les luminosités infrarouges totales de l'ensemble des galaxies ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$ sont comprises entre $10^{10}M_{\odot}$ et $10^{12}M_{\odot}$, et environ la moitié des objets sont situés de part et d'autre de la limite à $10^{11}M_{\odot}$, correspondant aux LIRG ("Luminous InfraRed Galaxies"). Les galaxies de type spirale précoce et tardive apparaissent des deux côtés de la luminosité maximale des LIRG. A noter qu'aucune des galaxies du relevé n'atteint la luminosité des ULIRGs, qui pourrait cependant être atteinte par certaines des 43 galaxies n'ayant pas de spectroscopie optique.

La mesure des fonctions de luminosité à $12\mu\text{m}$ de l'ensemble de ces galaxies indique un excès de galaxies d'un facteur 2 à 5 aux luminosités infrarouges $\gtrsim 10^{10.4}L_{\odot}$ par rapport aux galaxies locales (Rush et al. 1993; Pozzi et al. 2004). Ces divers résultats sont en accord avec les résultats obtenus avec *Spitzer* (Pérez-González et al. 2005; Le Floch et al. 2005), ainsi que des résultats plus récents (Le Borgne et al. 2009), indiquant la prédominance de LIRGs à $z \sim 0.5$ au sein des comptages à $15\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$.

Enfin, la mesure des luminosités totales infrarouge par unité de masse stellaire (estimées par l'émission optique) pour les sources à $12\mu\text{m}$ montre un excès d'un facteur 3 à 5 par rapport aux prédictions des scénarios PEGASE.3 (voir Fig. 6.8). Nous parvenons à modéliser cette dispersion en introduisant une stochasticté temporelle dans le taux de formation d'étoiles d'un facteur 5 et maintenue pendant plusieurs dizaines de millions d'années (Fioc, en préparation). L'examen visuel des images optiques indique qu'une partie des galaxies semblent être des spirales apparemment normales, d'autres objets ont des isophotes perturbés et se situent dans des environnement denses (groupes ou amas).

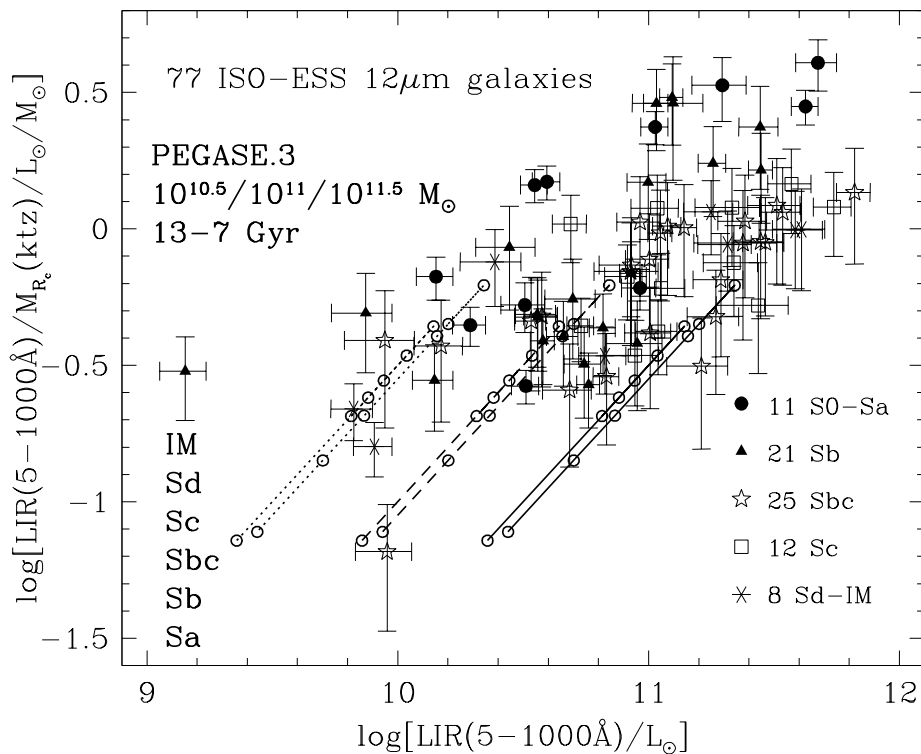


FIG. 6.8 – La distribution de la luminosité infrarouge totale par unité de masse stellaire pour les galaxies du relevé ESO-Sculpteur détectées à $12\mu\text{m}$ avec ISOCAM. On observe des galaxies de type spectral précoce qui sont 3 à 5 fois plus lumineuses que les spirales de type plus tardif, contrairement à ce qui est prédit par les scénarios PEGASE.3 des types Sa à Im (de bas en haut) pour des masses de $10^{10.5}M_{\odot}$ (lignes pointillés), $10^{11}M_{\odot}$ (lignes tiretées), $10^{11.5}M_{\odot}$ (lignes continues). Pour chaque valeur de masse, la prédiction est montrée pour des âges de 13 et 7 milliards d'années (avec un petit décalage des derniers en abscisse).

La meilleure photométrie qui sera obtenue avec le VST et VISTA (relevés KIDS et VIKING) dans cette région du ciel permettrait d'effectuer des décompositions bulbe+disque des galaxies ESO-Sculpteur au moyen des outils de morphologie automatique développés dans le cadre du programme EFIGI (voir Sect. 3), et avec une meilleure fiabilité qu'à partir des images ESO de moindre qualité. On pourrait alors examiner si certaines des sources contribuant à l'excès des comptages à $12\mu\text{m}$ sont compatibles avec des profils de galaxies composées uniquement d'un bulbe, ce qui permettrait de tester directement le modèle de Rocca-Volmerange et al. (2007). De manière générale, on pourrait préciser la nature optique des sources et distinguer les objets atypiques.

Références

- Aaronson, M. 1978, *ApJ*, 221, L103
- Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., Allam, S. S., et al. 2008, *ApJS*, 175, 297
- Andreon, S. 1998, *A&A*, 336, 98
- Arnouts, S. 1996, PhD thesis, Univ. Paris VII, (1996)
- Arnouts, S., de Lapparent, V., Mathez, G., et al. 1997, *A&AS*, 124, 163
- Ashman, K. M., Salucci, P., & Persic, M. 1993, *MNRAS*, 260, 610
- Athanassoula, E. 2005, *MNRAS*, 358, 1477
- Balcells, M. & Peletier, R. F. 1994, *AJ*, 107, 135
- Baugh, C. M., Benson, A. J., Cole, S., et al. 2002, in *The Mass of Galaxies at Low and High Redshift*, Venice 2001, eds. R. Bender, A. Renzini
- Bellanger, C. & de Lapparent, V. 1995, *ApJ*, 455, L103
- Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., et al. 1995, *A&AS*, 110, 159
- Bennett, C. L., Banday, A. J., Gorski, K. M., et al. 1996, *ApJ*, 464, L1+
- Berlind, A. A. & Weinberg, D. H. 2002, *ApJ*, 575, 587
- Berlind, A. A., Weinberg, D. H., Benson, A. J., et al. 2003, *ApJ*, 593, 1
- Berta, S., Magnelli, B., Lutz, D., et al. 2010, *A&A*, 518, L30+
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Bertin, E. & Dennefeld, M. 1997, *A&A*, 317, 43
- Bois, M., Bournaud, F., Emsellem, E., et al. 2010, *MNRAS*, 406, 2405
- Bolzonella, M., Miralles, J.-M., & Pelló, R. 2000, *A&A*, 363, 476
- Boroson, T. A. & Thompson, I. B. 1987, *AJ*, 93, 33
- Bournaud, F., Chapon, D., Teyssier, R., et al. 2011, *ApJ*, 730, 4
- Brand, K., Rawlings, S., Hill, G. J., et al. 2003, *MNRAS*, 344, 283
- Brimioulle, F., Lerchster, M., Seitz, S., Bender, R., & Snigula, J. 2008, *ArXiv eprint*
- Broadhurst, T. J., Ellis, R. S., Koo, D. C., & Szalay, A. S. 1990, 343, 726
- Bruzual, G. A. & Charlot, S. 1993, *ApJ*, 405, 538
- Busswell, G. S., Shanks, T., Outram, P. J., et al. 2004, *MNRAS*, 354, 991
- Buzzoni, B., Delabre, B., Dekker, H., et al. 1984, *The Messenger*, 38, 9
- Cabanac, R. A., de Lapparent, V., & Hickson, P. 2000, *A&A*, 364, 349
- Campos, A. & Shanks, T. 1997, *MNRAS*, 291, 383+
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnovic, D., et al. 2011, *ArXiv e-prints*
- Chary, R. & Elbaz, D. 2001, *ApJ*, 556, 562
- Choi, Y., Park, C., Kim, J., et al. 2010, *ApJS*, 190, 181
- Cimatti, A., Daddi, E., & Renzini, A. 2006, *A&A*, 453, L29
- Clowes, R. G. & Campusano, L. E. 1991, *MNRAS*, 249, 218
- Coil, A. L., Newman, J. A., Croton, D., et al. 2008, *ApJ*, 672, 153
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Cole, S., Norberg, P., Baugh, C. M., et al. 2001, *MNRAS*, 326, 255

- Colless, M. M., Peterson, B. A., Jackson, C. A., et al. 2003a, astro-ph/0306581
- Colless, M. M., Peterson, B. A., Jackson, C. A., et al. 2003b, astro-ph/0306581
- Connolly, A. J., Szalay, A. S., Bershadsky, M. A., Kinney, A. L., & Calzetti, D. 1995, *ApJ*, 110, 1071
- Cooper, M. C., Newman, J. A., Weiner, B. J., et al. 2008, *MNRAS*, 383, 1058
- Coupon, J., Ilbert, O., Kilbinger, M., et al. 2009, *A&A*, 500, 981
- Cross, N. J. G., Driver, S. P., Liske, J., et al. 2004, *MNRAS*, 349, 576
- Davis, M., Faber, S. M., Newman, J., et al. 2003, in *Discoveries and Research Prospects from 6- to 10-Meter-Class Telescopes II*. Edited by Guhathakurta, Puragra. *Proceedings of the SPIE*, Volume 4834, pp. 161-172 (2003)., 161-172
- Davis, M., Guhathakurta, P., Konidaris, N. P., et al. 2007, *ApJ*, 660, L1
- de la Torre, S., Meneux, B., De Lucia, G., et al. 2011, *A&A*, 525, A125+
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., & Bardelli, S. 2004, *A&A*, 422, 841
- de Lapparent, V., Bellanger, C., Arnouts, S., et al. 1993, *The Messenger*, 72, 34
- de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., & Arnouts, S. 2003, *A&A*, 404, 831
- de Lapparent, V., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1986a, *ApJ*, 302, L1
- de Lapparent, V., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1989a, *ApJ*, 343, 1
- de Lapparent, V., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1991, *ApJ*, 369, 273
- de Lapparent, V., Kurtz, M. J., & Geller, M. J. 1986b, *ApJ*, 304, 585
- de Lapparent, V., Mazure, A., Mathez, G., & Mellier, Y. 1989b, *The Messenger*, 55, 5
- de Lapparent, V. & Slezak, E. 2007, *A&A*, 472, 29
- De Lucia, G., Springel, V., White, S. D. M., Croton, D., & Kauffmann, G. 2006, *MNRAS*, 366, 499
- De Propriis, R., Conselice, C. J., Liske, J., et al. 2007, *ApJ*, 666, 212
- De Propriis, R., Couch, W. J., Colless, M., et al. 2002, *MNRAS*, 329, 87
- Debattista, V. P., Carollo, C. M., Mayer, L., & Moore, B. 2004, *ApJ*, 604, L93
- Dekker, H., D’Odorico, S., Kotzłowski, H., et al. 1991, *The Messenger*, 63, 73
- D’Odorico, S. 1990, *The Messenger*, 61, 51
- Dole, H., Le Floc’h, E., Pérez-González, P. G., et al. 2004, 154, 87
- Driver, S. P., Liske, J., Cross, N. J. G., De Propriis, R., & Allen, P. D. 2005, *MNRAS*, 360, 81
- Driver, S. P., Popescu, C. C., Tuffs, R. J., et al. 2007, *MNRAS*, 379, 1022
- Dunkley, J., Komatsu, E., Nolte, M. R., et al. 2009, *ApJS*, 180, 306
- Efstathiou, G., Ellis, R. S., & Peterson, B. A. 1988, *MNRAS*, 232, 431
- Einasto, J., Hütsi, G., Einasto, M., et al. 2003, *A&A*, 405, 425
- Eisenstein, D. J., Blanton, M., Zehavi, I., et al. 2005, *ApJ*, 619, 178
- Elbaz, D., Cesarsky, C. J., Chantal, P., et al. 2002, *A&A*, 384, 848
- Elbaz, D., Cesarsky, C. J., Fadda, D., et al. 1999, *A&A*, 351, L37
- Faucherre, M. 1995, *The Messenger*, 80, 5
- Ferguson, H. C. & Sandage, A. 1991, *AJ*, 101, 765
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1997, *A&A*, 326, 950
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1999, *A&A*, 344, 393
- Fioc, M., Rocca-Volmerange, B., & Dwek, E. 2011
- Flint, K., Metevier, A. J., Bolte, M., & Mendes de Oliveira, C. 2001, *ApJS*, 134, 53
- Folkes, S., Ronen, S., Price, I., et al. 1999, *MNRAS*, 308, 459
- Fort, B., Mellier, Y., Picat, J. P., Rio, Y., & Lelievre, G. 1986, in *Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference*, Vol. 627, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, ed. D. L. Crawford, 321-327
- Franceschini, A., Rodighiero, G., Vaccari, M., et al. 2010, *A&A*, 517, A74+
- Franzetti, P., Scodreggio, M., Garilli, B., et al. 2007, *A&A*, 465, 711
- Freedman, W. L., Madore, B. F., Gibson, B. K., et al. 2001, *ApJ*, 553, 47

- Fried, J. W., von Kuhlmann, B., Meisenheimer, K., et al. 2001, *A&A*, 367, 788
- Frith, W. J., Buswell, G. S., Fong, R., Metcalfe, N., & Shanks, T. 2003, *MNRAS*, 345, 1049
- Gabasch, A., Bender, R., Seitz, S., et al. 2004, *A&A*, 421, 41
- Galaz, G. 1997, PhD thesis, , Paris VI University, (1997)
- Galaz, G. & de Lapparent, V. 1998, *A&A*, 332, 459
- Garilli, B., Le Fèvre, O., Guzzo, L., et al. 2008, *A&A*, 486, 683
- Geller, M. J. & Huchra, J. P. 1989, *Science*, 246, 897
- Geller, M. J., Kurtz, M. J., & de Lapparent, V. 1984, *ApJ*, 287, L55
- Gott, J. R., Choi, Y., Park, C., & Kim, J. 2009, *ApJ*, 695, L45
- Gott, III, J. R., Dickinson, M., & Melott, A. L. 1986, *ApJ*, 306, 341
- Gott, III, J. R., Hambrick, D. C., Vogeley, M. S., et al. 2008, *ApJ*, 675, 16
- Gott, III, J. R., Weinberg, D. H., & Melott, A. L. 1987, *ApJ*, 319, 1
- Graham, A. W. & Worley, C. C. 2008, *MNRAS*, 388, 1708
- Groth, E. J. & Peebles, P. J. E. 1977, *ApJ*, 217, 385
- Guedes, J., Callegari, S., Madau, P., & Mayer, L. 2011, *ArXiv e-prints*
- Guisard, S. 1996, *The Messenger*, 83, 11
- Guisard, S., Weilenmann, U., van Dijsseldonk, A., Käufl, H. U., & Roucher, J. 1997, *The Messenger*, 90, 9
- Guzzo, L., Pierleoni, M., Meneux, B., et al. 2008, *Nature*, 451, 541
- Haines, C. P., Campusano, L. E., & Clowes, R. G. 2004, *A&A*, 421, 157
- Hamilton, A. J. S., Gott, III, J. R., & Weinberg, D. 1986, *ApJ*, 309, 1
- Hamuy, M., Suntzeff, N. B., Heathcote, S. R., et al. 1994, *PASP*, 106, 566
- Hamuy, M., Walker, A. R., Suntzeff, N. B., et al. 1992, *PASP*, 104, 533
- Hawkins, E., Maddox, S., Cole, S., et al. 2003, *MNRAS*, 346, 78
- Heyl, J., Colless, M., Ellis, R. S., & Broadhurst, T. 1997, *MNRAS*, 285, 613
- Hoyle, F. & Vogeley, M. S. 2004, *ApJ*, 607, 751
- Huchra, J., Davis, M., Latham, D., & Tonry, J. 1983, *ApJS*, 52, 89
- Ilbert, O., Lauger, S., Tresse, L., et al. 2006, *A&A*, 453, 809
- Jauzac, M., Dole, H., Le Floch, E., et al. 2011, *A&A*, 525, A52+
- Jenkins, A., Frenk, C. S., White, S. D. M., et al. 2001, *MNRAS*, 321, 372
- Jerjen, H. & Tammann, G. A. 1997a, *A&A*, 321, 713
- Jerjen, H. & Tammann, G. A. 1997b, *A&A*, 321, 713
- Kaiser, N. & Peacock, J. A. 1991, *ApJ*, 379, 482
- Kaviraj, S., Kirkby, L. A., Silk, J., & Sarzi, M. 2007, *MNRAS*, 382, 960
- Kennicutt, R. C. 1992, *ApJS*, 79, 255
- Kewley, L. J., Jansen, R. A., & Geller, M. J. 2005, *PASP*, 117, 227
- Kurucz, R. L. 1992, in *IAU Symp. 149: The Stellar Populations of Galaxies*, 225
- La Franca, F., Gruppioni, C., Matute, I., et al. 2004, *AJ*, 127, 3075
- Lagache, G., Dole, H., & Puget, J.-L. 2003, *MNRAS*, 338, 555
- Lagache, G., Puget, J.-L., & Dole, H. 2005, *ARA&A*, 43, 727
- Landolt, A. U. 1992, *AJ*, 104, 372
- Le Borgne, D., Elbaz, D., Ocvirk, P., & Pichon, C. 2009, *A&A*, 504, 727
- Le Borgne, D. & Rocca-Volmerange, B. 2002, *A&A*, 386, 446
- Le Floch, E., Papovich, C., Dole, H., et al. 2005, *ApJ*, 632, 169
- Lilly, S. J., Cowie, L. L., & Gardner, J. P. 1991, *ApJ*, 369, 79
- Lin, H., Yee, H. K. C., Carlberg, R. G., et al. 1999, *ApJ*, 518, 533
- Loveday, J., Peterson, B. A., Efsthathiou, G., & Maddox, S. J. 1992, *ApJ*, 390, 338
- MacTavish, C. J., Ade, P. A. R., Bock, J. J., et al. 2006, *ApJ*, 647, 799

- Maddox, S. J., Efstathiou, G., & Sutherland, W. J. 1990a, MNRAS, 246, 433+
- Maddox, S. J., Efstathiou, G., Sutherland, W. J., & Loveday, J. 1990b, MNRAS, 243, 692
- Maddox, S. J., Sutherland, W. J., Efstathiou, G., Loveday, J., & Peterson, B. A. 1990c, MNRAS, 247, 1P
- Madgwick, D. S., Lahav, O., Baldry, I. K., et al. 2002, MNRAS, 333, 133
- Magnelli, B., Elbaz, D., Chary, R. R., et al. 2009, A&A, 496, 57
- Mathis, H., Lemson, G., Springel, V., et al. 2002, MNRAS, 333, 739+
- Metcalfe, N., Shanks, T., Fong, R., & Roche, N. 1995, MNRAS, 273, 257
- Miller, L., Croom, S. M., Boyle, B. J., et al. 2004, MNRAS, 355, 385
- Montero-Dorta, A. D. & Prada, F. 2009, MNRAS, 399, 1106
- Ocvirk, P., Pichon, C., & Teyssier, R. 2008, MNRAS, 390, 1326
- Oppenheimer, B. D., Davé, R., Kereš, D., et al. 2010, MNRAS, 406, 2325
- Papovich, C., Dole, H., Egami, E., et al. 2004, 154, 70
- Park, C., Choi, Y., Vogeley, M. S., et al. 2005a, ApJ, 633, 11
- Park, C., Choi, Y.-Y., Vogeley, M. S., et al. 2005b, ApJ, 633, 11
- Park, C. & Gott, III, J. R. 1991, MNRAS, 249, 288
- Peng, Y., Lilly, S. J., Kovač, K., et al. 2010, ApJ, 721, 193
- Percival, W. J., Cole, S., Eisenstein, D. J., et al. 2007, MNRAS, 381, 1053
- Perez-Gonzalez, P. G., Gallego, J., Zamorano, J., et al. 2003, ApJ, in press, astro-ph/0303088
- Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Egami, E., et al. 2005, ApJ, 630, 82
- Perlmutter, S., Aldering, G., Goldhaber, G., et al. 1999, ApJ, 517, 565
- Poggianti, B. M. 1997, A&AS, 122, 399
- Pogosyan, D., Pichon, C., Gay, C., et al. 2009, MNRAS, 396, 635
- Pomarède, D., Fidaali, Y., & Teyssier, R. 2009, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 406, Numerical Modeling of Space Plasma Flows: ASTRONUM-2008, ed. N. V. Pogorelov, E. Audit, P. Colella, & G. P. Zank, 317–+
- Popescu, C. C., Tuffs, R. J., Dopita, M. A., et al. 2011, A&A, 527, A109+
- Postman, M., Geller, M. J., & Huchra, J. P. 1988, AJ, 95, 267
- Pozzi, F., Gruppioni, C., Oliver, S., et al. 2004, ApJ, 609, 122
- Puech, M., Hammer, F., Flores, H., et al. 2010, A&A, 510, A68+
- Puech, M., Hammer, F., Lehnert, M. D., & Flores, H. 2007, A&A, 466, 83
- Ratcliffe, A., Shanks, T., Parker, Q. A., et al. 1998, MNRAS, 300, 417
- Riess, A. G., Filippenko, A. V., Challis, P., et al. 1998, AJ, 116, 1009
- Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., & Fioc, M. 2007, A&A, 475, 801
- Rocca-Volmerange, B. & Guiderdoni, B. 1988, A&AS, 75, 93
- Rodighiero, G., Vaccari, M., Franceschini, A., et al. 2010, A&A, 515, A8+
- Rush, B., Malkan, M. A., & Spinoglio, L. 1993, 89, 1
- Sajina, A., Scott, D., Dennefeld, M., et al. 2006, MNRAS, 369, 939
- Sandage, A., Binggeli, B., & Tammann, G. A. 1985, AJ, 90, 1759
- Sanders, D. B. & Mirabel, I. F. 1996, ARA&A, 34, 749
- Scannapieco, C., Gadotti, D. A., Jonsson, P., & White, S. D. M. 2010, MNRAS, 407, L41
- Scannapieco, E. & Broadhurst, T. 2001, ApJ, 549, 28
- Schaeffer, R. & Silk, J. 1988, A&A, 203, 273
- Schechter, P. 1976, ApJ, 203, 297
- Schuecker, P. & Ott, H. 1991, ApJ, 378, L1
- Scodeggio, M., Franzetti, P., Garilli, B., et al. 2005, PASP, 117, 1284
- Segalovitz, A. 1975, A&A, 40, 401
- Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., & de Lapparent, V. 2007, A&A, 475, 791

- Shectman, S. A., Landy, S. D., Oemler, A., et al. 1996, *ApJ*, 470, 172
- Silk, J. 2011, ArXiv e-prints
- Skrutskie, M. F. 2001, *BAAS*, 33, 827
- Small, T. A., Ma, C., Sargent, W. L. W., & Hamilton, D. 1999, *ApJ*, 524, 31
- Sodre, L. & Cuevas, H. 1997, *MNRAS*, 287, 137
- Sousbie, T., Colombi, S., & Pichon, C. 2009, *MNRAS*, 393, 457
- Sousbie, T., Pichon, C., Courtois, H., Colombi, S., & Novikov, D. 2008, *ApJ*, 672, L1
- Springel, V., White, S. D. M., Jenkins, A., et al. 2005, *Nature*, 435, 629
- Stoughton, C., Lupton, R. H., Bernardi, M., et al. 2002, *AJ*, 123, 485
- Takeuchi, T. T., Buat, V., Iglesias-Páramo, J., Boselli, A., & Burgarella, D. 2005, *A&A*, 432, 423
- Tarenghi, M. & Wilson, R. N. 1989, in Presented at the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference, Vol. 1114, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, ed. F. J. Roddier, 302–313
- Teyssier, R., Chapon, D., & Bournaud, F. 2010, *ApJ*, 720, L149
- Trentham, N. & Tully, R. B. 2002, *MNRAS*, 335, 712
- Tyson, J. A. 1988, *AJ*, 96, 1
- van der Laan, H. 1988a, *The Messenger*, 52, 3
- van der Laan, H. 1988b, *The Messenger*, 51, 1
- van der Laan, H. 1989, *The Messenger*, 55, 2
- Vergani, D., Scodeggio, M., Pozzetti, L., et al. 2008, *A&A*, 487, 89
- Vettolani, G., Zucca, E., Zamorani, G., et al. 1997, *A&A*, 325, 954
- Vigroux, L., Souviron, J., Lachieze-Rey, M., & Vader, J. P. 1988, *A&AS*, 73, 1
- Vogele, M. S., Park, C., Geller, M. J., Huchra, J. P., & Gott, J. R. I. 1994, *ApJ*, 420, 525
- Wake, D. A., Nichol, R. C., Eisenstein, D. J., et al. 2006, *MNRAS*, 372, 537
- Weinberg, D. H., Gott, III, J. R., & Melott, A. L. 1987, *ApJ*, 321, 2
- Weiss, A. G. & Buchert, T. 1993, *A&A*, 274, 1
- Widrow, L. M., Perrett, K. M., & Suyu, S. H. 2003, *ApJ*, 588, 311
- Williger, G. M., Campusano, L. E., Clowes, R. G., & Graham, M. J. 2002, *ApJ*, 578, 708
- Wolf, C., Meisenheimer, K., Rix, H.-W., et al. 2003, *A&A*, 401, 73
- Xu, C., Lonsdale, C. J., Shupe, D. L., O’Linger, J., & Masci, F. 2001, *ApJ*, 562, 179
- Yee, H. K. C., Morris, S. L., Lin, H., et al. 2000, *ApJS*, 129, 475
- Zehavi, I., Eisenstein, D. J., Nichol, R. C., et al. 2005a, *ApJ*, 621, 22
- Zehavi, I., Weinberg, D. H., Zheng, Z., et al. 2004, *ApJ*, 608, 16
- Zehavi, I., Zheng, Z., Weinberg, D. H., et al. 2005b, *ApJ*, 630, 1
- Zucca, E., Ilbert, O., Bardelli, S., et al. 2006, *A&A*, 455, 879

Troisième partie

LE CATALOGUE MORPHOLOGIQUE EFIGI

Chapitre 1

Introduction

1.1 Les catalogues morphologiques

Le catalogue RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991) a longtemps été la référence pour obtenir les types morphologiques ainsi que des informations sur la présence de barres et d’anneaux pour les galaxies proches. Au total ~ 23000 galaxies avec $B_T \lesssim 15.5$ ont été répertoriées à partir de plaques photographiques. En ce qui concerne l’étude des particularités morphologiques, des catalogues complémentaires se limitent à une ou quelques propriétés pour de petits échantillons et/ou dans des régions préférentielles du ciel (Kormendy 1979; Buta 1995; Naim et al. 1997; Buta et al. 2006, 2007).

Récemment, la mise à disposition des images et des catalogues du relevé “Sloan Digital Sky Survey” (SDSS, <http://www.sdss.org>) a permis la création de larges base de données morphologiques. D’une part le “Galaxy Zoo” (Lintott et al. 2008) utilise la participation du grand public pour obtenir la classification de centaines de milliers d’objets selon des critères simples : profil lisse ou avec disque, composantes multiples, nombre de bras et enroulement, proéminence du bulbe, barres, anneaux, allées de poussières et irrégularités. D’autre part, une classification par type de Hubble avec attributs secondaires signalant la présence de barres, anneaux, lentilles, distortions, queues de marée, bras spiraux, et poussière, ainsi que le niveau d’intensité de certains d’entre eux a été obtenue par Nair & Abraham (2010) pour ~ 14000 galaxies du SDSS.

1.2 Liens entre les caractéristiques spectrales et morphologiques des galaxies

La morphologie des galaxies apparaît comme étroitement liée à la formation d’étoile et son évolution. D’une part, les différents types de galaxies identifiés historiquement sur plaques photographiques, et plus récemment dans les grands relevés digitaux ont des distributions en énergie spectrale caractéristiques, indiquant pour chacune une forme spécifique d’évolution de la formation d’étoiles avec le temps (Guidedoni & Rocca-Volmerange 1987, A&A 186, 1; Bruzual & Charlot 1993, ApJ 405, 538). En outre, les images profondes du ciel obtenues avec les grands télescopes au sol et le Télescope Spatial de Hubble ont montré que la morphologie des galaxies a évolué de façon marquée depuis $z \sim 2$, les galaxies spirales apparaissant de plus en plus perturbées à grande distance, avec des indices d’interactions et fusions de plus en plus fréquents (Brinchmann *et al.* 1998, ApJ 499, 112).

Si l’évolution spectrale des galaxies a été largement défrichée en utilisant la photométrie et de la spectroscopie intégrée des objets, l’évolution de la morphologie reste à quantifier précisément. La difficulté réside dans l’instabilité des estimateurs de forme disponibles jusqu’à présent, en raison de leur sensibilité à la qualité des images (bruit, échantillonnage, réponse impulsionnelle), et aux effets de sélection (brillance de surface). Or la morphométrie, ou mesure de paramètres de forme, offre des perspectives intéressantes car elle permet d’explicitier la nature des variations spectrales. Lors de sursauts de formation d’étoiles,

on devrait distinguer par morphométrie les modes simples de changement, par exemple l’amplification d’une composante ou la déformation des profils. Pour les mêmes raisons, la morphométrie peut aussi être un outil performant pour poser des contraintes sur les taux de fusions majeures des différents types de galaxies, qui sont, d’après les modèles de formation hiérarchique des galaxies, à l’origine des galaxies les plus massives observées actuellement.

La forme intrinsèque et apparente des galaxies a aussi des conséquences sur les mesures statistiques caractérisant les galaxies et leur évolution. La mesure de la poussière dans les disques a montré que les magnitudes B des disques et bulbes peuvent être atténuées jusqu’à 1-2 magnitudes aux fortes inclinaisons : jusqu’à 35% et 71% des photons émis par les disques et bulbes respectivement peuvent être absorbés dans l’Univers local, ce qui ne peut manquer d’affecter sensiblement les catalogues optiques existants (Driver *et al.* 2007, MNRAS 379, 1022), et les modélisation spectrales qui en sont déduites. En outre, les propriétés réelles et observées des galaxies dans l’optique dépendent de leur inclinaison (Maller *et al.* 2009, ApJ 691, 394), et un large échantillon recensant les caractéristiques des galaxies en fonction de l’inclinaison est nécessaire pour corriger ces effets.

1.3 Statut actuel de la morphométrie des galaxies

Au niveau des algorithmes, il est possible d’ajuster des profils réguliers (Simard *et al.* 2002), et de mesurer les déviations par rapport à ces profils (Conselice 1997). Mais ces outils sont dépendants de la réponse impulsionnelle,

Les outils disponibles et largement utilisés jusqu’à présent sont GIM2D (Simard 1998) et GALFIT (Peng *et al.* 2002), qui offrent en mode automatique une décomposition bulbe+disque, mais souffrent notamment d’une modélisation approximative de la réponse impulsionnelle et ne sont pas optimisés pour une application sur des grands échantillons contenant des centaines de milliers de galaxies. En outre, ces outils ne prennent pas en compte l’ensemble des caractéristiques morphologiques des objets (bras spiraux, anneaux, barres, poussière).

Quant aux mesures de concentration, d’asymétrie et de morcellement (Abraham *et al.* 1994; Conselice *et al.* 2000; Conselice 2003), les coefficients de Gini mesurant le degré de variation de la distribution de lumière (Abraham *et al.* 2003), les mesures de “granularité” (Yamauchi *et al.* 2005), les harmoniques circulaires pour la modélisation des bras spiraux (?), toutes ces approches sont malheureusement dépendantes du seeing, de l’échantillonnage et des caractéristiques du bruit des images, ne permettant pas une comparaison fiable entre différents relevés (Lisker 2008).

Parmi les approches de morphométrie visuelle figurent le “Galaxy Zoo” : 1 million de galaxies du SDSS ont été classées par le grand public selon des critères simples : profil lisse ou avec disque, composantes multiples, nombre de bras et enroulement, proéminence du bulbe, barres, anneaux, allées de poussières et irrégularités (Lintott *et al.* 2008). Cette analyse montre que la “bi-modalité” du diagramme couleur-magnitude des galaxies cache des populations importantes de galaxies spirales rouges, et une population moindre mais réelle de galaxies elliptiques bleues. Le catalogue “Galaxy Zoo” montre aussi une corrélation marginale ($2 - 3\sigma$) entre les sens de rotation de galaxies voisines, ce qui pourrait être la preuve d’un couplage gravitationnel entre les halos de matière noire au moment de l’effondrement des grandes structures (Slosar *et al.* 2009).

Le lien entre la morphologie des galaxies et leur environnement a pu être réexploré récemment grâce aux nouveaux grands relevés, apportant des clarifications et de nouvelles interrogations. Par la mesure de la concentration et de l’indice de Sersic pour 80 000 galaxies du SDSS, la bi-modalité dans la relation couleur-magnitude des galaxies apparaît comme déterminée par la densité locale de galaxies, le lien morphologie-densité découlant de la relation couleur-densité, qui, elle, serait intrinsèque (Blanton *et al.* 2005). Cependant, une analyse du catalogue de Shapley-Ames ne confirme pas la dichotomie couleur-magnitude quand les galaxies sont examinées par type morphologique le long de la séquence de Hubble (van den Bergh 2007). En outre, la relation diamètre-magnitude des galaxies semble indépendante de la densité de l’environnement dans l’Univers local (van den Bergh 2008), mais cela doit être confirmé avec de plus grands échantillons.

En parallèle, les simulations de formation des galaxies dans un Univers avec matière noire dominé par une constante cosmologique (Lambda-CDM) produisent des prédictions sur la morphologie des galaxies. Par exemple, l'analyse des deux approches actuelles de simulations semi-analytiques (modèles de Durham et du Max-Planck Astroph. Inst.) suggère que, hormis les galaxies elliptiques les plus massives, la majorité des galaxies elliptiques et spirales acquièrent leur masse stellaire par des fusions mineures ou des instabilités de disque (Parry et al. 2009). Par des simulations N-corps+SPH, Debattista et al. (2006) montrent aussi que la formation des barres est un phénomène majeur dans l'évolution séculaire des disques. En effet, la fréquence observée des barres a diminué d'un facteur 3 pendant la dernière moitié de l'âge de l'Univers, en lien avec l'accroissement de la masse stellaire, le rougissement et la plus grande prééminence du bulbe, ce qui indique une maturation "dynamique" des galaxies massives (Sheth et al. 2008). Les bulbes des galaxies précoces avec barres semblent avoir en outre subi un enrichissement en métaux différent des bulbes sans barres, suggérant que la formation des bulbes et des barres est liée (Pérez & Sánchez-Blázquez 2011).

Au moyen de simulations hydrodynamiques de formation de grandes spirales, Scannapieco et al. (2010) montrent la distinction entre les mesures photométriques et dynamiques des rapports de flux disque/total, et la difficulté de réconciliation avec les observations. Des comparaisons des modèles avec des échantillons observés de quelques milliers de galaxies fournissent en outre des résultats intéressants, et soulignent la nécessité de confrontation avec de grands échantillons statistiques. À titre d'exemple, la fraction des galaxies spirales ayant de très petits disques est bien plus importante dans les données (SDSS) que dans les prédictions des simulations numériques Lambda-CDM (Barazza et al. 2008); et les galaxies les plus vieilles à $z \sim 2$ étaient extrêmement compactes (Damjanov et al. 2009).

Cet état des lieux montre la nécessité de mettre en place des outils performants de morphométrie permettant de comparer les propriétés des galaxies proches avec celles des galaxies à $z \gtrsim 1$. La seule approche numérique réellement fiable pour effectuer des mesures morphométriques comparatives entre relevés est l'ajustement de modèles convolués par la réponse impulsionnelle. Ces outils doivent être appliqués à des échantillons statistiques basés sur une imagerie CCD multi-couleur et bien échantillonnée. Des catalogues de référence recensant toutes les caractéristiques morphologiques des galaxies, avec une validation visuelle sont de surcroît nécessaires pour le contrôle et la calibration des outils automatiques. Dans ce qui suit, je décris les programmes mis en place à l'IAP afin de suivre cette démarche.

Chapitre 2

Morphologie visuelle

Avec l’objectif de pouvoir tester et calibrer les algorithmes automatiques de morphométrie qui sont discutés dans Sect. 3, nous nous sommes attachés à la construction d’un catalogue de référence fournissant l’intensité de divers attributs morphologiques pour tous les types de Hubble.

Ce projet fait partie du programme “Extraction de Formes Idéalisées de Galaxies en Imagerie” (EFIGI) initié en 2004 par Emmanuel Bertin, qui mit sur pied une collaboration entre les laboratoires d’astrophysique indiqués ci-dessous et deux laboratoires spécialisés dans le traitement du signal (Laboratoire “Traitement de Communication de l’Information”, LTCI; et Laboratoire “Recherche et Développement de l’EPITA”, LRDE). La collaboration obtint un financement par le biais d’une “Action Concertée Incitative” de type “Masses de Données”, et permis à Anthony Baillard, élève de l’Ecole pour l’Informatique et les Techniques Avancées (EPITA), de démarrer une thèse à l’IAP. L’autre volet du programme était le développement d’outils de morphométrie de haut niveau permettant d’analyser dans des temps suffisamment courts les grands relevés multi-couleurs tels que le CFHTLS et WIRDS.

Je fus immédiatement séduit par le projet, ayant constaté par l’analyse du relevé ESO-Sculpteur les limites de la caractérisation des populations de galaxies par leur propriétés spectrales ou photométriques. J’entrevois alors, pour mieux comprendre la formation et l’évolution des galaxies, l’importance d’une exploration d’un espace des paramètres plus large que les simples mesures de flux auquel, on ajouterait celles de la taille et de la forme des objets.

2.1 Collaborateurs

- Emmanuel Bertin (IAP)
- Anthony Baillard (ex-doctorant IAP ; actuellement dans le privé)
- Henry McCracken (IAP)
- Yannick Mellier (IAP)
- Stéphane Arnouts (TCFH, en détachement du Laboratoire d’Astrophysique de Marseille)
- Pascal Fouqué (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Jean-François Leborgne (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Roser Pelló (Laboratoire d’Astrophysique de Toulouse Tarbes)
- Philippe Prugniel (Centre de Recherches Astronomique de Lyon)
- Dmitry Makarov (Special Astrophysical Observatory, Russie)
- Lidia Marakova (Special Astrophysical Observatory, Russie)
- Albert Bijaoui (Observatoire Nice Côte d’Azur)
- Lidia Tasca (Laboratoire d’Astrophysique de Marseille)

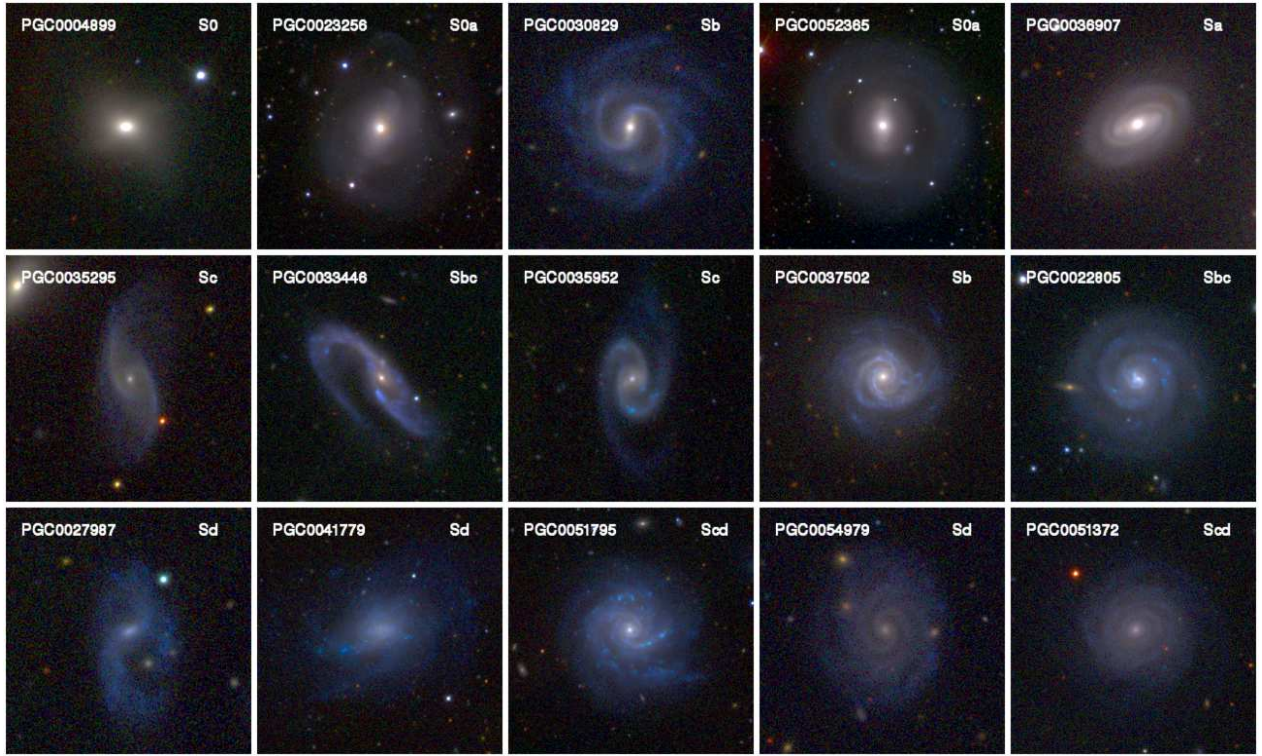


FIG. 2.1 – Images de galaxies illustrant l’attribut caractérisant la courbure des bras spiraux. Les 5 niveaux d’attributs sont montrés horizontalement (croissant vers la droite), et pour chaque niveau, 3 galaxies de type de plus en plus tardif sont affichées de haut en bas.

2.2 Echantillon étiqueté EFIGI

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”, Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A., *A&A*, sous presse.

Thèse: “Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies”, Baillard, B., 2008 (<http://efigix.iap.fr/theseAB/>)

Article: “An Automatic Method to Determine the Degree of Flocculence of a Galaxy”, Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., Baillard, A., Bertin, E., **de Lapparent, V.** and Mellier, Y., Fouqué, P., Borgne, J.-F. L. and Pelló, R., Makarov, D., Makarova, L., Prugniel, P., Arnouts, S., 2008, *ASP Conference Series* 394, pp. 497.

L’échantillon comprend 4458 galaxies proches avec imagerie *ugriz* extraite du relevé DR4 du SDSS et plusieurs mesures du type RC3 (de Vaucouleurs et al. 1991), conduisant à une mesure fiable du type morphologique dans le catalogue PGC (“Principal Galaxy Catalogue”, Paturel et al. 1995). Les objets sont distribués sur toute la région du ciel couverte par le “Data Release 4” du SDSS, soit 6851 deg².

Après construction des images couleurs “*gri*” rééchantillonnées afin d’avoir la même taille angulaire apparent des objets tout en conservant la brillance de surface, nous avons défini des attributs morphologiques décrivant les différentes composantes des galaxies, dont leur structure dynamique et leur texture, ainsi que l’apparence des objets sur le ciel et leur environnement. Les 16 attributs choisis mesurent pour

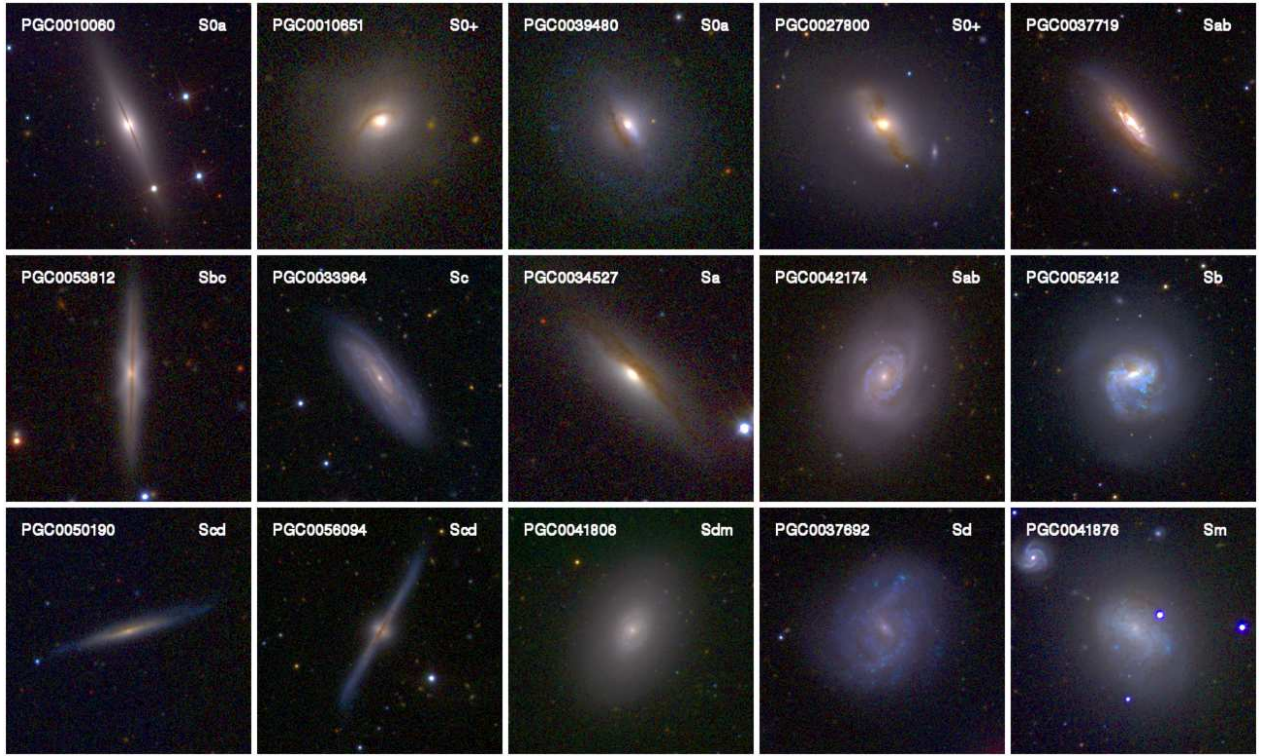


FIG. 2.2 – Même chose que la Fig. précédente pour l'attribut caractérisant la dispersion de la poussière.

chaque galaxie les quantités suivantes:

- le rapport de luminosité du bulbe sur la luminosité totale de l'objet
- la longueur des barres et l'intensité des anneaux internes et externes
- l'intensité des bras spiraux, leur courbure et leur sens de rotation
- la présence et la dispersion de la poussière
- la flocculence et les régions de formation intense d'étoiles
- la perturbation du profil
- la contamination du profil, le nombre de galaxies voisines.

La définition détaillée des différents attributs est donnée dans l'article choisi n° 7 (p. 200, Baillard et al. 2011), et dans la Table 1 de l'article choisi n° 8 (p. 231).

L'objectif de ces attributs est de relier la forme d'une galaxie aux phénomènes physiques sous-jacents, en caractérisant les composantes stellaires, gazeuses, et poussiéreuses ainsi que les structures dynamiques, et aussi de prendre en compte l'impact de l'environnement immédiat et les biais d'observation sur la forme apparente d'une galaxie. Des images de galaxies illustrant deux des attributs sont montrées dans les Figs. 2.1 et 2.2.

Le groupe d'astronome fut mobilisé pour procéder à l'étiquetage visuel des images “*gri*” selon 5 niveaux d'intensité pour chacun des 16 attributs, ainsi qu'un intervalle de confiance, soit 3 mesures par attribut. La grande disparité des mesures effectuées par les différents astronomes (Baillard et al. 2011) nous a cependant contraint, E. Bertin et moi-même, à homogénéiser l'ensemble des attributs. Le catalogue résultant fournit une base de donnée unique par sa grande statistique, sa complétude de $\sim 80\%$ à $10 \leq g \leq 14$, sa diversité et son homogénéité. Les images et catalogues sont accessibles en ligne sur le site du projet (<http://www.efigi.org>). La constitution du catalogue d'attributs fit partie de la thèse de doctorat d'Anthony Baillard.

Le catalogue EFIGI est principalement limité en diamètre apparent à 1 minute d'arc. Le diamètre est mesuré par D_{25} (de Vaucouleurs et al. 1976), correspondant à l'isophote auquel la brillance de surface est

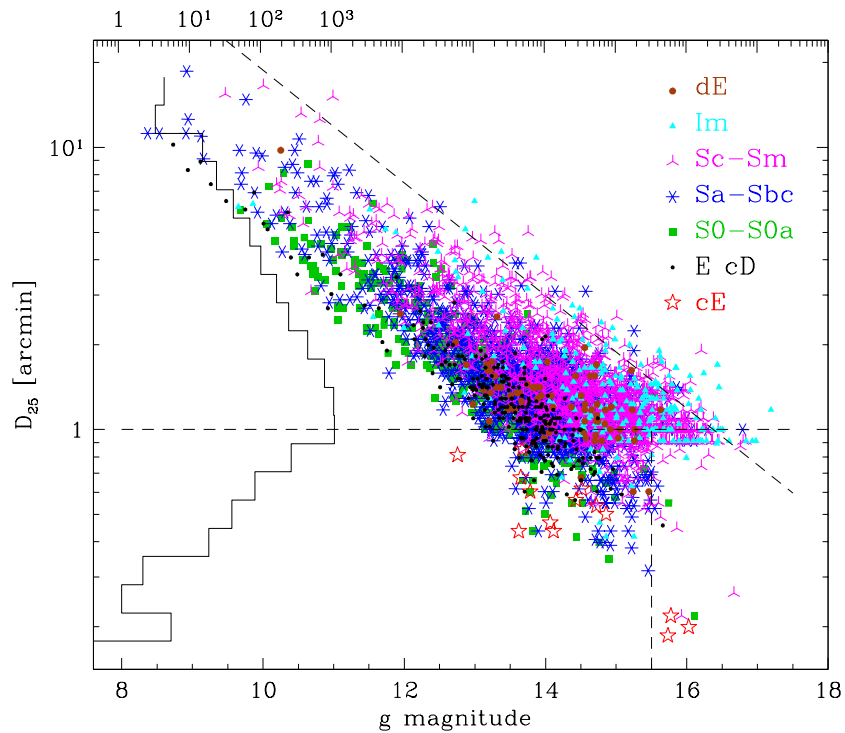


FIG. 2.3 – Diamètre isophotal D_{25} en minute d’arc en fonction de la magnitude g des galaxies du catalogue EFIGI. Ce graphe montre que le catalogue est limité en diamètre apparent à 1 minute d’arc (l’histogramme vertical montre la décroissance rapide du nombre de galaxies en dessous de cette valeur), à $g \sim 15.5$, ces 2 limites correspondant aux catalogue RC3, et à 25 mag. par seconde d’arc carré en brillance de surface (ligne inclinée), correspondant à la limite visuelle sur une copie papier des plaques du “Palomar Observatory Sky Survey” (Abell 1959).

25 mag/arcsec²; c’est la limite au delà de laquelle il est difficile d’effectuer une identification visuelle d’un objet ou d’une partie d’un objet à partir de copies sur papier des plaques photographiques du Palomar (Abell 1959). Cette sélection en diamètre contraste avec la limitation en magnitude apparente des autres catalogues morphologiques existants, et conduit à un excellent échantillonnage des spirales tardives et des irrégulières, qui est une des spécificités du catalogue EFIGI. Ce dernier contient entre ~ 150 et 500 galaxies dans chaque type de Hubble (sauf pour les types rares comme les cD et les cE), avec une grande diversité de caractéristiques morphologiques par type.

J’ai complété l’échantillon EFIGI des différentes mesures de décalages vers le rouge provenant des bases de données HyperLeda, NED, SDSS et VAGC pour un ensemble de plus de 99.5% des galaxies, ainsi que des spectres SDSS. le catalogue EFIGI est mis à la disposition de la communauté (sur le site <http://www.efigi.org>), et au CDS.

2.3 Article choisi n° 7

“The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”

Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A.

Astronomy & Astrophysics, sous presse

2011

2.4 Description statistique de la séquence de Hubble

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology II. Statistical properties along the Hubble sequence”, de **Lapparent, V.**, Baillard, B., Bertin, E., *A&A*, sous presse.

La richesse du catalogue EFIGI permet de mener pour la première fois à $z \sim 0.05$ des analyses statistiques concernant une grande diversité de propriétés morphologiques pour l'éventail complet des types de Hubble. En particulier, ce catalogue permet pour la première fois d'effectuer une description détaillée et quantitative de la séquence visuelle de Hubble (de Lapparent et al. 2011). On constate la diminution du rapport de luminosité bulbe/total le long de la séquence de Hubble, avec cependant une grande dispersion de 5 types, ainsi que la décroissance progressive de l'enroulement des bras, qui sont les critères principaux dans l'établissement de la séquence de Hubble visuelle (van den Bergh 1998).

On remarque par ailleurs que la contribution des disques à la lumière intégrée des galaxies augmente le long de la séquence de Hubble, les spirales les plus tardives étant dominées par les disques, alors que les spirales précoces sont dominées par les bulbes. Ce n'est que dans les spirales intermédiaires (Sb and Sbc) que la lumière du disque semble concentrée dans les bras spiraux. On montre en outre que cet effet, combiné avec une décroissance rapide de la quantité de poussière visible des types Sb aux types Sbc-Sc, conduit au “grand dessin” des spirales Sc.

Il est intéressant de noter que seules les galaxies Sm et Im sont perturbées fréquemment et significativement dans leur profil, probablement à cause d'interactions plus fréquentes, ou parce que celles-ci auraient laissé des traces à cause de leurs plus faibles masses. En outre, l'échantillon EFIGI montre qu'on détecte de la poussière dans tous les types de galaxies lenticulaires et spirales, avec un maximum pour les types Sb. La dispersion de la poussière augmente cependant régulièrement le long de la séquence de Hubble. Quant à la flocculence et aux régions de formation intense d'étoiles, ces deux attributs augmentent entre les types Sa et Sb, puis restent stables jusqu'aux types les plus tardifs (Sm Im).

TAB. 2.1 – *Pourcentage des galaxies EFIGI selon les 5 niveaux de longueur de barre*

Type EFIGI	Longueur de Barre						
	0	incertaine	1	2	3	4	1-2-3-4
cE cD E	100± 8	-	-	-	-	-	-
S0 ⁻	87±11	11± 3	2± 1	-	-	-	2± 1
S0	59± 9	14± 4	12± 3	11± 3	2± 1	2± 1	28± 5
S0 ⁺	51± 8	5± 2	5± 2	15± 4	20± 5	3± 2	43± 7
S0a	50± 7	8± 2	5± 2	14± 3	14± 3	8± 2	42± 6
Sa	39± 6	10± 3	4± 2	25± 4	14± 3	8± 2	51± 7
Sab	23± 4	6± 2	5± 2	23± 4	27± 5	16± 3	71± 9
Sb	37± 4	11± 2	4± 1	18± 2	21± 3	9± 2	52± 5
Sbc	44± 4	11± 2	9± 2	19± 3	12± 2	6± 1	46± 4
Sc	45± 6	10± 2	11± 3	24± 4	9± 2	1± 1	45± 6
Scd	55± 6	14± 2	13± 2	15± 3	3± 1	1± 1	31± 4
Sd	32± 6	11± 3	13± 3	29± 5	11± 3	3± 2	56± 8
Sdm	39± 5	26± 4	7± 2	17± 3	10± 2	1± 1	34± 5
Sm	55± 7	22± 4	2± 1	16± 3	5± 2	-	22± 4
Im	77± 9	16± 3	-	5± 2	2± 1	-	7± 2
dE	88±17	4± 3	2± 2	5± 3	-	2± 2	9± 4
Tous les disques	46± 2	13± 1	7± 1	17± 1	12± 1	5± 1	41± 1
Toutes les spirales	42± 2	13± 1	7± 1	20± 1	13± 1	5± 1	45± 2
Tous les types	54± 2	12± 1	6± 1	15± 1	10± 1	4± 1	35± 1

Ces résultats sont corroborés et précisés par les analyses effectuées par A. Baillard lors sa thèse de doctorat. Il a montré que l'on peut utiliser les attributs EFIGI pour restituer avec précision le type morphologique de Hubble par un apprentissage supervisé au moyen d'une "machine à vecteur de support" (SVM), permettant de séparer des nuages de points dans un espace de grande dimensionnalité (16 pour EFIGI). La précision qui en résulte est semblable à celle des astronomes en comparaison à la classification du RC3. En outre, il a appliqué une méthode de perte de précision qui consiste à oter un attribut, puis à mesurer la perte en précision qui en résulte sur le type de Hubble). Il a constaté que les attributs les plus significatifs pour la détermination de la séquence de Hubble sont par ordre décroissant d'importance : (1) le rapport de luminosité bulbe/total; (2) l'intensité des bras spiraux; (3) la courbure des bras spiraux. Viennent ensuite la quantité de poussière visible et la flocculence, avec des pertes de précision deux et trois fois moindres resp., que pour la courbure des bras (Baillard 2008).

Concernant les structures dynamiques des galaxies EFIGI, on observe que les barres sont fréquentes parmi tous les types de Hubble excepté les E et dE, et sont détectées dans 30 à 40% des lenticulaires, 20 à 70% des spirales, et 7% des Im; les barres les plus longues se situent dans les spirales Sab, pour lesquelles la fréquence de barres de toute longueur est aussi la plus grande (voir Table 2.1; la colonne "incertaine" qualifie la présence d'une barre, et non pas sa longueur). Les anneaux internes se produisent dans 25% des galaxies et sont 2 fois plus fréquents que les anneaux externes; les anneaux internes sont les plus fréquents dans les galaxies S0a, Sa, Sab, et uniquement dans les S0a pour les anneaux externes.

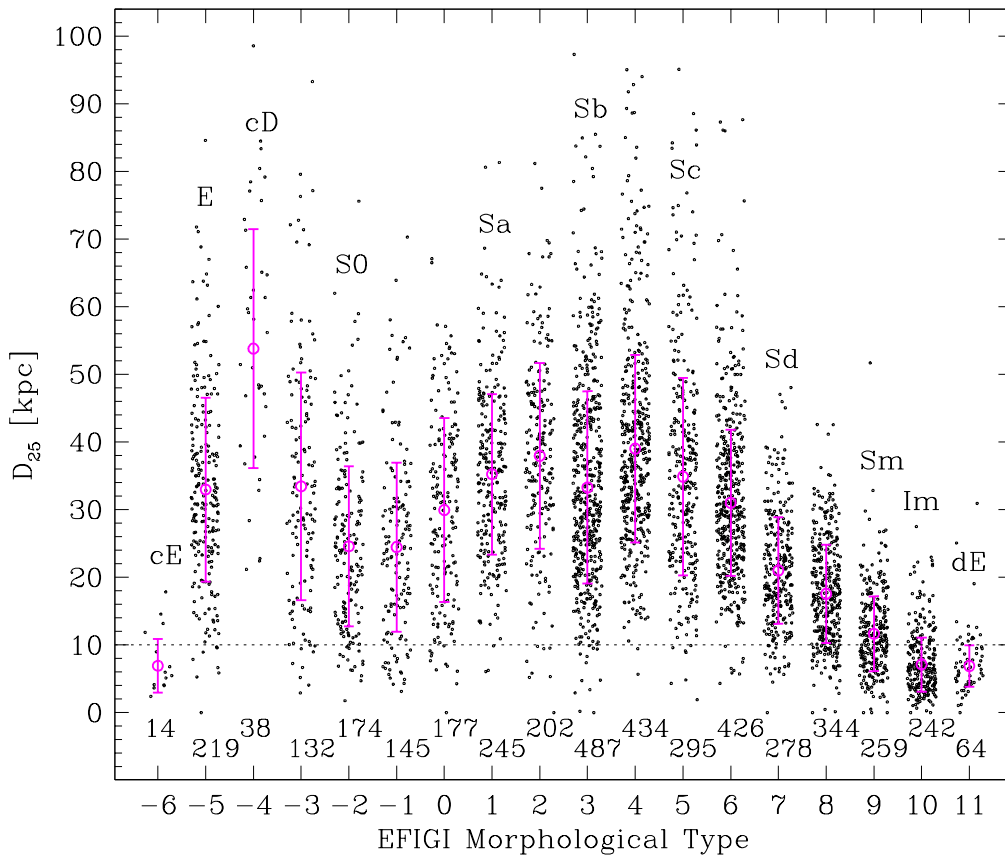


FIG. 2.4 – la distribution des diamètres intrinsèques des objets calculés à partir du D_{25} pour 4156 galaxies EFIGI en fonction du type morphologique; pour chaque type, la moyenne pondérée et la dispersion (avec rejet à 3σ) sont indiquées (une limite indicative à 10 kpc est indiquée en pointillés).

Cette analyse montre enfin une croissance progressive du diamètre des galaxies et de la brillance de surface associée le long de la séquence de Hubble, montrées dans les Figs. 2.4 et 2.5). Les plus grandes

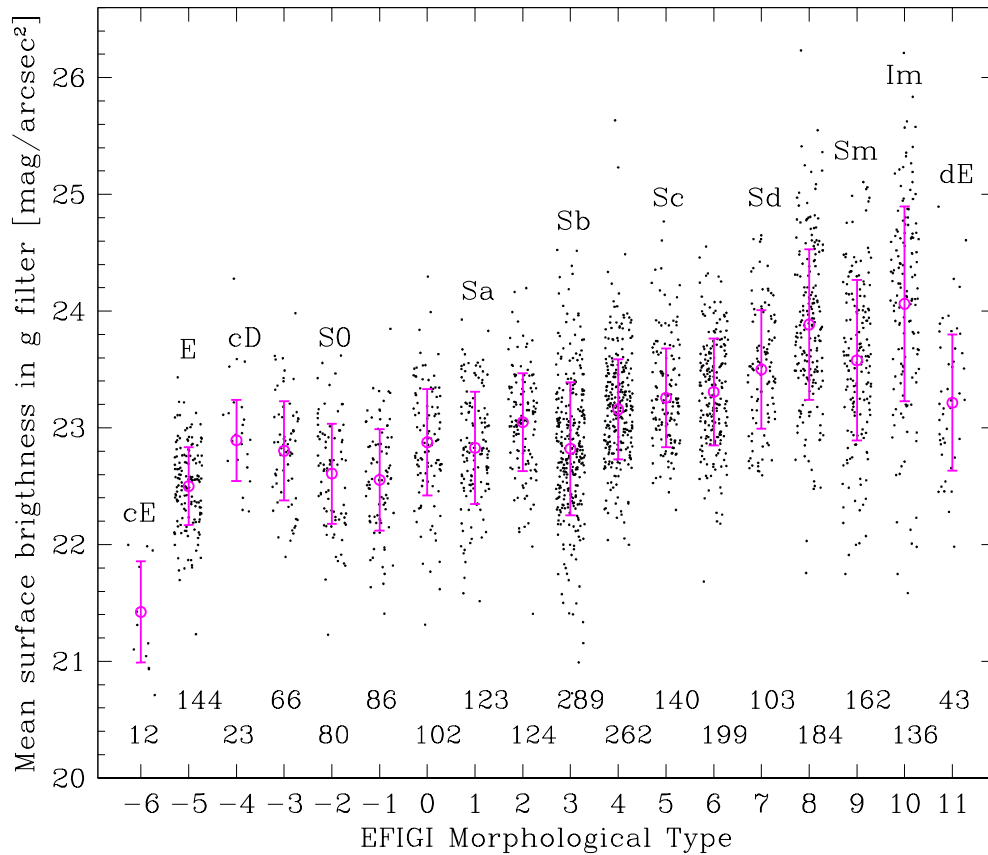


FIG. 2.5 – Même chose que dans la Fig. 2.4 pour la brillance de surface déduite du D_{25} pour 2273 galaxies EFIGI peu inclinées et faiblement contaminées.

galaxies sont les cD, puis les elliptiques et les spirales intermédiaires Sab-Sbc ($D_{25} \simeq 20 - 50$ kpc), alors que les Sd-Sdm-Sm sont deux fois plus petites. Les galaxies lenticulaires ont une taille intermédiaire ($D_{25} \simeq 15 - 35$ kpc), et les irrégulières, les elliptiques compactes (cE) et les naines elliptiques (dE et dS0) sont confirmées comme étant de petits objets ($D_{25} \simeq 5 - 15$ kpc).

2.5 Galaxies naines spirales

Grace à l'attribut d'écrivant l'intensité des bras, j'ai découvert dans l'échantillon EFIGI deux galaxies naines spirales, montrées dans la Fig. 2.6. Celles-ci sont des objets rares dans les classes morphologiques des spirales Sa à Scd (Schombert et al. 1995; Sandage & Binggeli 1984). La galaxie de gauche a des bras spiraux remarquablement réguliers et plutôt ouverts, alors qu'ils sont un peu plus fermés dans celle de droite, et avec une très légère asymétrie. Les 2 galaxies ont une petite barre, et une très faible flocculence. La structure spirale de la galaxie de droite rappelle celle que l'on voit, à un niveau de contraste moindre, dans certaines galaxies naines de type dE du catalogue EFIGI; ces dernières sont fréquentes parmi les plus brillantes dE de l'amas de la Vierge (Barazza et al. 2002; Lisker et al. 2006). Il serait intéressant d'examiner, au moyen de simulations numériques, quelles sont les contraintes posées sur les halos de matière noire sous-jacents pour obtenir des structures spirales de ce type, et d'évaluer leur stabilité temporelle.

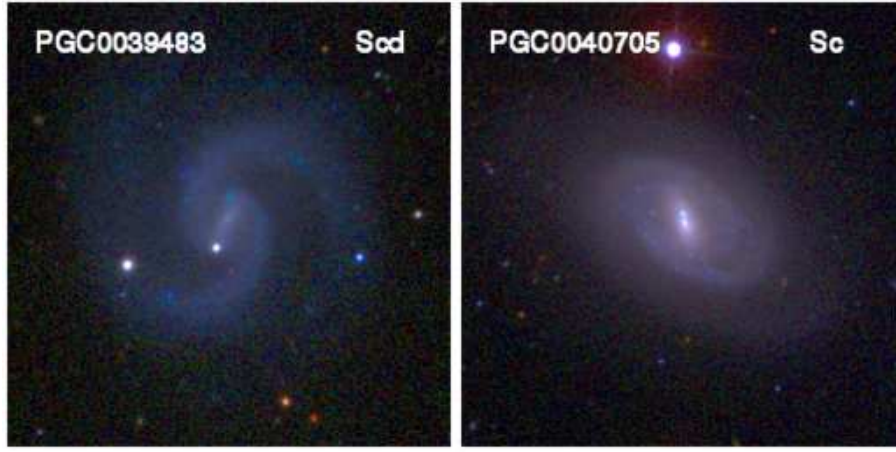


FIG. 2.6 – Images en “vraies couleurs” irg des 2 galaxies naines spirales trouvées dans le catalogue EFIGI. Ces galaxies ont pour décalage spectral 0.0026385 et 0.0006414 resp., pour magnitude absolue en g -16.9 et -14.8 resp., et pour diamètre isophotal intrinsèque (D_{25}) 5.7 kpc et 1.9 kpc resp.

2.6 Article choisi n° 8

“The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology II. Statistical properties along the Hubble sequence”

de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E.

Astronomy & Astrophysics, sous presse

2011

Chapitre 3

Morphologie automatique

Dans un deuxième temps, nous nous sommes attachés à caractériser quantitativement les objets, par l'application d'un outil automatique d'ajustement de profil convolué. La morphologie visuelle permet de contrôler les résultats automatiques, et d'améliorer leur qualité. Les résultats décrits ici s'appuient sur la mesure fiable des flux des objets. Je présente les premiers résultats concernant les fonctions de luminosité par type morphologique. Je montre par ailleurs des résultats préliminaires concernant les composantes séparées de bulbe et de disque,

3.1 Erreurs de photométrie dans le relevé SDSS

La photométrie SDSS des galaxies d'EFIGI montre des erreurs importantes pour de nombreux objets, se manifestant par une queue excédentaire de galaxies faibles, qui n'est pas présente si l'on utilise la photométrie photographique du RC3 (Baillard et al. 2011). Les logiciels de photométrie du SDSS ont été optimisés pour traiter les galaxies de diamètre isophotal apparent inférieur à 2 minutes d'arc, alors que 811 galaxies, soit 18% du catalogue EFIGI, mesurent entre 2 et 20 minutes d'arc (et 2693 entre 1 et 2 minute d'arc).

Pour refaire ce travail de mesure, j'ai utilisé les nouvelles fonctionnalités de SExtractor (Bertin & Arnouts 1996) qui permettent l'ajustement non-linéaire de chaque objet par un profil bi-dimensionnel convolué par la réponse impulsienne (Bertin 2010). Les profils ajustés ici sont la somme d'une loi en $r^{1/4}$ pour le bulbe, et d'un profil exponentiel pour le disque, définis comme suit :

- loi “de Vaucouleurs” $I(r) = I_0 e^{-7.67(r/re)^{1/4}}$,
- loi exponentielle $I(r) = I_0 e^{-1.68r/re}$.

Des analyses avec un indice variable pour la première loi sont aussi possibles (loi de Sérsic) et ont été menées; elles sont discutées dans les articles en préparation (Sects. 3.4 et 3.5). Les magnitudes ainsi calculées par SExtractor sont nommées “MAG_MODEL”.

Pour le relevé SDSS, j'utilise le “Data Release 7” du SDSS (Abazajian et al. 2009; DR7 par la suite), et les magnitudes “model” et “Petrosian”. Ces dernières sont des magnitudes d'ouverture, calculées dans un rayon adaptatif ayant une brillance de surface annulaire correspondant à une fraction fixe de la brillance de surface moyenne. L'ouverture étant définie dans la bande g pour les autres 4 filtres $ugiz$, cette magnitude vise à un calcul fiable des couleurs. Dans le panneau de droite, les magnitudes SDSS “model” sont utilisées. Celles-ci sont le résultat dans un premier temps de l'ajustement de 2 profils bi-dimensionnels distincts, d'une part une loi “de Vaucouleurs”, d'autre par une loi exponentielle (définies ci-dessus), avec rapport d'axe et angle de position variable. Dans une deuxième étape, une combinaison linéaire des 2 meilleurs profils de chaque type ci-dessus est ajustée à nouveau à l'image de l'objet, et la magnitude résultant fournit la magnitude “model” des catalogues du SDSS.

La Fig. 3.1 montre, pour les galaxies d'EFIGI, la différence dans la bande g entre les magnitudes “model” du SDSS, et les magnitudes “MAG_MODEL” obtenues par SExtractor. Si l'on examine le lieu

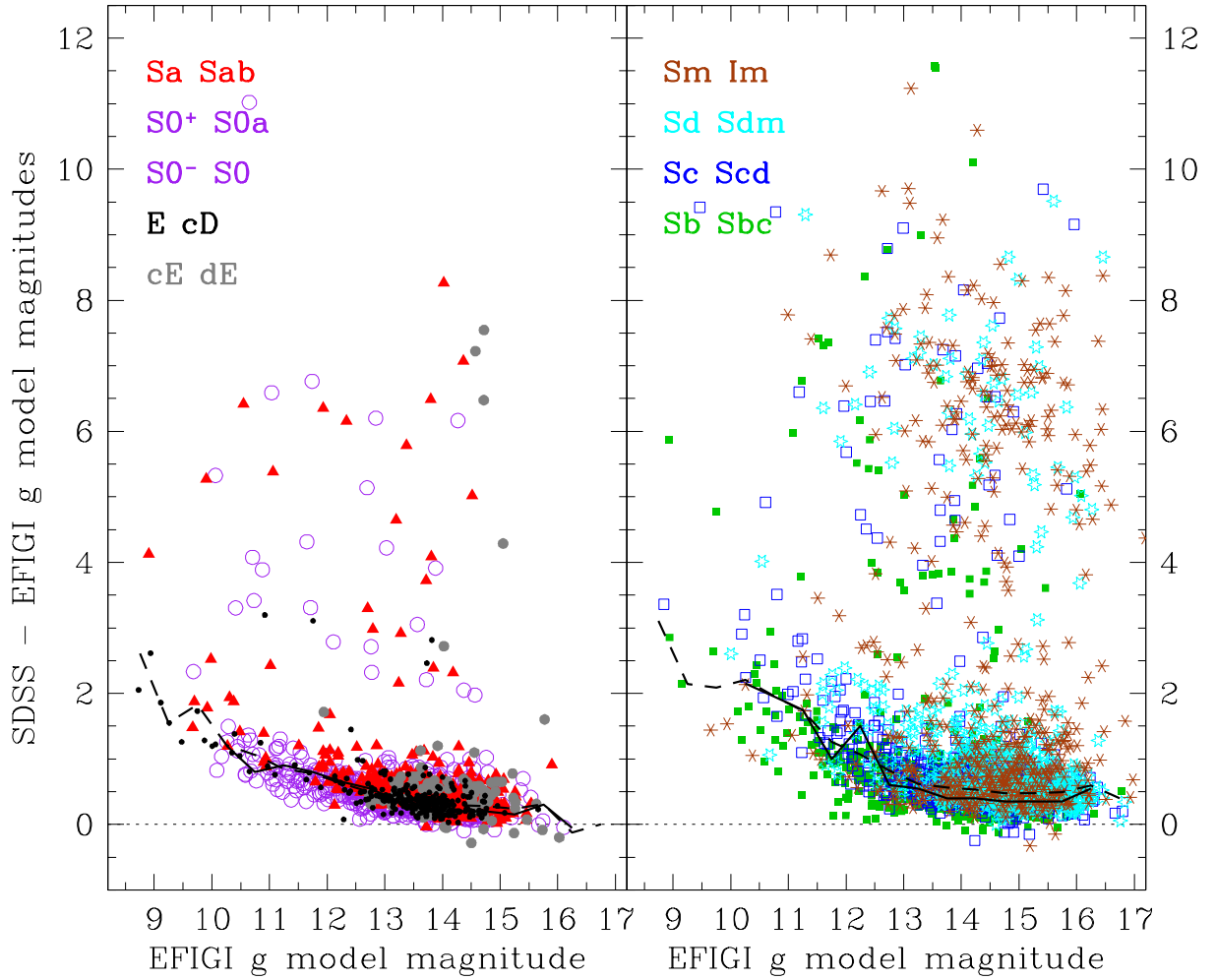


FIG. 3.1 – Différence entre les magnitudes “model” fournies dans les catalogues du relevé SDSS et celle obtenues avec *SExtractor*, dans la bande *g* et pour les 4458 galaxies d’EFIGI (de Lapparent & Bertin, 2011a, en préparation). Les différents types morphologiques sont indiqués, les galaxies avec bulbe dominant sont regroupées dans le panneau de gauche, les spirales tardives et les irrégulières dans le panneau de droite. La courbe continue indique le mode, et la courbe pointillée la médiane par intervalle de 0.5 magnitude (les moyennes sont très proches des médianes). Des courbes analogues sont obtenues en utilisant les magnitudes d’ouverture du SDSS (“Petrosian”), avec un décalage légèrement supérieur pour les galaxies précoces entre *g* 13-15. Ces figures montrent une surestimation systématique des flux pour les galaxies brillantes dans le SDSS, ainsi qu’une surestimation catastrophique de 2 à 10 magnitudes pour certaines galaxies, dont principalement les types tardifs.

de la majorité des galaxies (guidé par les courbes indiquant le mode et la médiane), on observe un afadissement systématique des magnitudes SDSS aux magnitudes brillantes : le fond de ciel n’est pas estimé assez loin des objets, il est par conséquent contaminé par l’objet. Cet effet est présent jusqu’aux magnitudes les plus faibles d’EFIGI, soit $g = 15 - 16$, où il est 0.25 magnitude pour les galaxies de type jusqu’à Sab, et de 0.50 magnitude pour les galaxies spirales plus tardives. Le biais augmente à 1 magnitude à $g \simeq 11 - 12$ et à 2 magnitudes pour les objets plus brillants. À noter que la transition entre les galaxies à 2 min d’arc se produit à $g = 12.5 - 13.5$ pour les galaxies précoces (panneau de gauche), et à $g = 13.5 - 14.5$ pour les spirales tardives. On s’attend à ce qu’il y ait un meilleur accord entre les magnitudes SDSS et celles obtenues avec SExtractor à $g \sim 17 - 18$, mais cela devra être confirmé.

L’autre effet remarqué dans la Fig. 3.1 (panneau de droite) est l’écart de magnitude très important pour une petite fraction des galaxies (@% pour l’ensemble des types), pour lesquelles l’écart de magnitude entre les catalogue SDSS et les mesures SExtractor s’étale entre 2 et ~ 10 magnitudes. L’effet est plus marqué pour les galaxies spirales plus tardives que Sb. L’examen de la photométrie par SExtractor de ces objets m’a permis d’analyser le problème. Les attributs EFIGI montrent qu’à partir du type Sb, la flocculence du disque augmente fortement (de Lapparent et al. 2011). Combiné à un bulbe moins dominant, cela a pour effet de causer un morcellement des objets par les algorithmes de segmentation des sources. L’effet est particulièrement aigu pour les galaxies à faible brillance de surface comme les Sd, Sm et les Im. À noter que les naines n’ayant pas ce problème de flocculence (les cE et dE), elles sont très rares à présenter ces écarts de magnitude. On observe les mêmes effets de biais systématique et de morcellement dans les autres filtres (*uriz*).

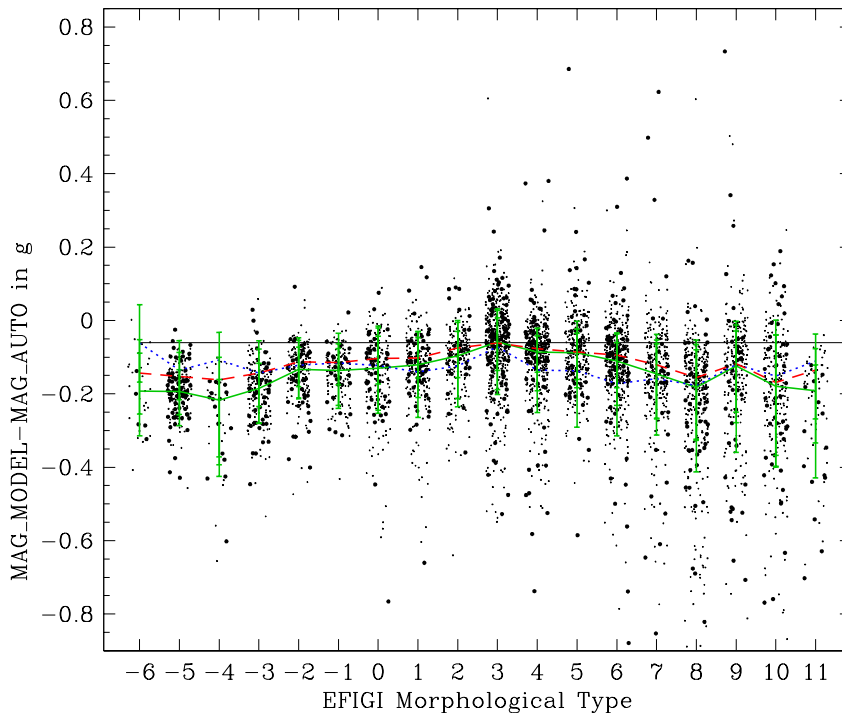


FIG. 3.2 – Différence entre les magnitudes “modèle” et d’ouverture (*MAG_AUTO*) de SExtractor dans la bande *g* pour les 4458 galaxies EFIGI, en fonction du type morphologique. Les valeurs médianes et les quantiles à 70% sont en vert. Les médianes dans les filtres *u* et *z* sont indiquées en bleu et rouge resp. La ligne horizontale indique le décalage attendu entre la magnitude *MAG_AUTO* et la “vraie” magnitude.

J’ai par ailleurs montré que les magnitudes “modèles” calculées par SExtractor sont fiables et robustes. Ces magnitudes sont intégrées jusqu’à l’infini, et par conséquent permettent de s’affranchir du problème de troncature des magnitudes d’ouverture. La différence entre ces deux types de magnitude est montrée dans la Fig. 3.2. On observe que la fraction du flux manquant dépend du type morphologique, avec 0.2

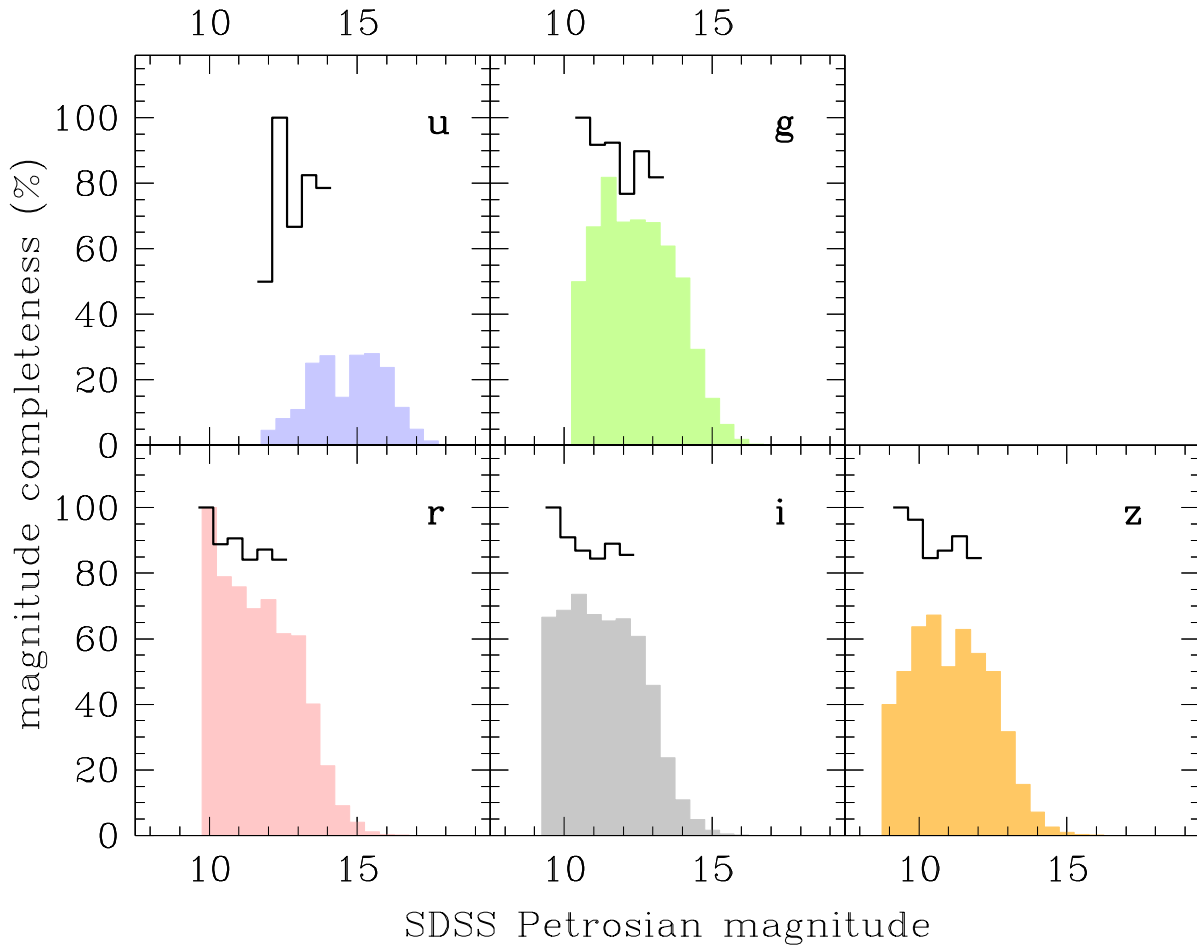


FIG. 3.3 – Histogrammes bruts de complétude photométrique du catalogue EFIGI par rapport au relevé SDSS DR4 dans les 5 filtres SDSS (histogrammes colorés), et premiers intervalles des histogrammes corrigés obtenus après élimination des fausses sources (trait plein noir).

mag pour les elliptiques (type -5), 0.12 mag pour les S0 (type -2), 0.15 mag pour les Sdm (type 8). On obtient la valeur nominale de 0.06, prédite par les simulations (ligne horizontale dans la Fig. 3.2) pour les Sbc et Sc (types 4-5).

La dispersion dans la différence de magnitude est cependant importante, d'environ 0.10 mag pour tous les types. Elle est due en partie :

- à la contamination par des objets voisins ou superposés, qui participent faiblement au calcul de la magnitude “modèle”, mais peuvent être pris en compte dans la magnitude d’ouverture ;
- aux allées de poussières qui sont partiellement corrigées dans les ajustements des modèles ;
- au morcellement des galaxies de faible brillance de surface discuté ci-dessus (principalement pour les Sdm, Sm et Im).

J’ai pu limiter ce dernier effet en ajustant le paramètre SExtractor de segmentation des sources “DE-BLEND_MINCONT”, après examen visuel des ~ 200 galaxies présentant des écarts importants dans la Fig. 3.2. L’avantage des ajustements de modèles est d’exclure les étoiles ou galaxies contaminantes lorsqu’elles sont situées dans les ailes des profils, alors que ces objets ne sont pas systématiquement exclus par la segmentation, et peuvent fortement biaiser la mesure de magnitude d’ouverture. On remarque que les écarts entre les magnitudes SDSS et SExtractor de plus de 2 magnitudes ne sont pas dus à une

contamination des magnitudes SDSS par des étoiles ou des galaxies : cela conduirait à une sur-estimation du flux dans le SDSS (soit à des différences négatives dans la Fig. 3.1).

Enfin, le calcul de la complétude photométrique du catalogue EFIGI m’a conduit à constater qu’un grand nombre de source brillantes répertoriées dans le catalogue photométrique du SDSS sont des artefacts. J’ai visualisé les 890 galaxies les plus brillantes du SDSS qui ne font pas partie de l’échantillon EFIGI, au moyen de l’outil de visualisation “Explore”. Seulement 95 galaxies proches furent identifiées avec une magnitude “Petrosian” correspondant à celle annoncée. Un tiers des 795 sources restantes étaient des objets compacts (étoiles ou galaxies lointaines). Ces objets ont des magnitude “psf” de 20 à 22 dans le filtre r , et leur magnitude “Petrosian” est contaminées par la halo d’une étoile brillante. Les deux tiers restants sont des sources “fantômes” causées par des halos d’étoiles brillantes, ou par des tracés de satellites. Le nombre de fausses sources est particulièrement élevé dans le filtre u . J’obtiens une complétude photométrique corrigée du catalogue EFIGI de $\sim 80\%$ aux magnitudes 12-14 (selon le filtre), alors que les complétude brutes étaient de $\sim 30\%$ en u , et $\sim 60 - 70\%$ en g , r , i , et z (voir Fig. 3.3).

3.2 Séquence couleur-magnitude

Le relevé SDSS avait montré une bi-modalité dans la distribution couleur-magnitude des galaxies, caractérisée par un pic correspondant aux galaxies rouges et de type “précoce” dans la séquence de Hubble, et un excès plus étalé de galaxies bleues et de type “tardif”, avec de surcroît la suggestion d’un minimum dénommé “vallée verte” pour les types intermédiaires. La première mise en évidence provenait des couleurs apparent $u - r$ en fonction de la magnitude apparente g (Strateva et al. 2001). Cet effet fut ensuite confirmé au moyen des magnitudes et couleurs absolues (Hogg et al. 2002; Blanton et al. 2003; Baldry et al. 2004) et a produit des contraintes sur les modèles semi-analytiques de formation des galaxies (Baldry et al. 2004, 2006). Un résultat similaire avait été constaté pour les galaxies du RC3 (Conselice 2006), qui montrait en outre que les galaxies de type Sa-Sab-Sb peuplent la “vallée verte”.

Récemment, van den Bergh (2007) a montré en utilisant les 1246 galaxies du “Revised Shapley-Ames Catalogue of Bright Galaxies” (Sandage & Tammann 1981) pour lesquelles le type de Hubble est connu avec précision, qu’il n’y a pas de dichotomie entre les galaxies rouges et bleues, mais plutôt une transition progressive en couleur le long de la séquence morphologique dans le diagramme couleur-magnitude (mes magnitudes utilisées sont ici photographiques[®]). C’est ce que l’on peut observer dans les deux panneaux de la Fig. 3.4, montrant la séquence couleur-magnitude obtenue pour les galaxies d’EFIGI : un glissement remarquablement continu depuis les galaxies elliptiques qui sont brillantes et rouges, jusqu’aux galaxies irrégulières qui sont les plus bleues et les moins lumineuses ; mais pas de séparation entre les populations de galaxies rouges et bleues, ni de “vallée verte”, la région de couleur intermédiaire contenant les galaxies de types Sab à Sbc. La couleur $u - r$ présente l’avantage de couvrir un grand intervalle spectral, et le domaine de longueur d’onde au repos couvert par le filtre u est sensible à l’histoire de la formation d’étoile dans les galaxies. J’obtiens cependant des résultats similaires avec les couleurs $u - g$, $g - r$, et $g - i$.

On peut se demander si le fait que l’échantillon EFIGI soit limité en diamètre apparent plutôt qu’en magnitude apparente, comme le sont les relevés existants puisse jouer un rôle dans l’absence de la bi-modalité couleur-magnitude détectée pour les galaxies plus faibles du relevé SDSS. Dans Baillard et al. (2011), nous avons montré que le catalogue EFIGI sous-échantillonne les types de Sa à Sc, et suréchantillonne les elliptiques, les spirales tardives (Sd-Sm), et les irrégulières. Ces effets vont dans le sens d’accentuer le contraste des éventuels “pics” rouge et bleu et de la “vallée verte” du diagramme couleur-magnitude. Par l’éclatement du diagramme couleur-magnitude pour chaque type morphologique, dans le panneau de droite de la Fig. 3.4, on constate que la présence de pic ou vallée dépend de la densité relative de chaque type morphologique, et dépend donc des effets de sélections affectant les différents types des échantillons du SDSS considérés.

La Fig. 3.5 montre pour comparaison les diagrammes couleur-magnitude obtenus pour les galaxies d’EFIGI lorsqu’on extrait la photométrie du catalogue DR7 du relevé SDSS. Dans le panneau de gauche de la Fig. 3.5, les magnitudes “Petrosian” sont utilisées (Petrosian 1976). On voit en comparant les Figs. 3.4 et 3.5 que les trois séquences présentent des différences notables. Dans la Fig. 3.5, les couleurs SDSS des galaxies de type Sa-Sab, Sb-Sbc, et Sc-Scd sont plus rouges de près de 0.5 magnitude que celles

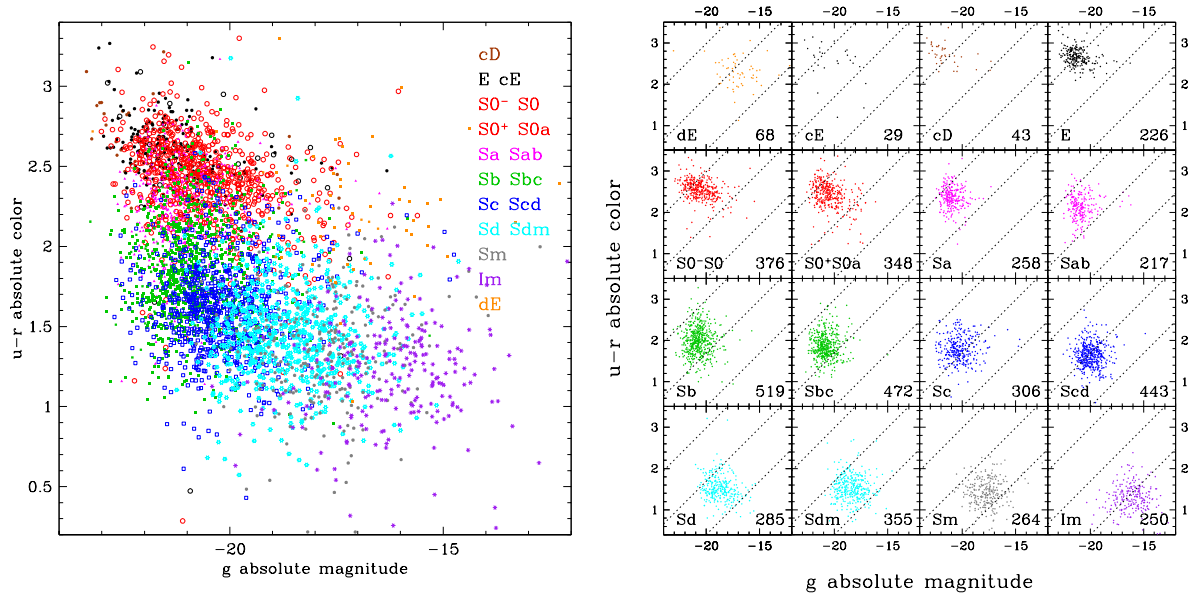


FIG. 3.4 – A gauche, la séquence de couleur absolue $u - r$ en fonction de la magnitude absolue g pour les différents types morphologiques des 4458 galaxies du catalogue FIGI, en utilisant les magnitudes obtenues par ajustement de profils avec SExtractor. Il n’y a pas de dichotomie entre les galaxies bleues et rouges, mais plutôt un glissement progressif dans l’espace couleur-magnitude des différents types de la séquence de Hubble. Ce glissement est visible dans le graphique de droite, montrant dans chaque cadrant les différents types de Hubble, depuis les galaxies s’apparentant aux elliptiques, jusqu’aux types plus tardifs (en allant de haut en bas et de gauche à droite).

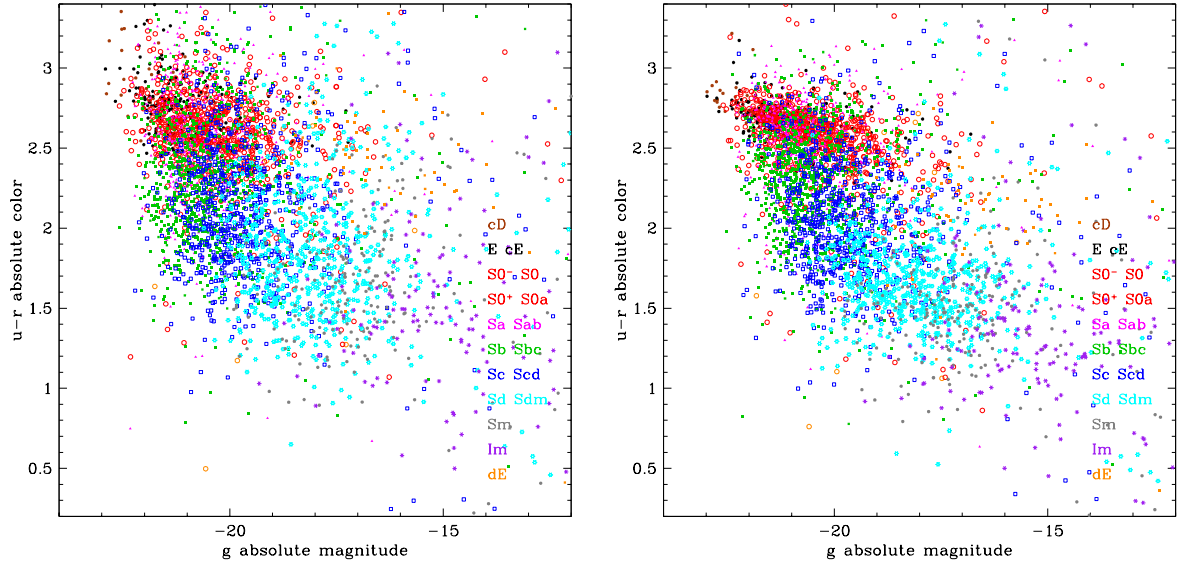


FIG. 3.5 – Même chose que dans la Fig. 3.4 pour les magnitudes extraites du relevé SDSS DR7. A gauche, il s’agit des magnitudes “Petrosian”, a droite, des magnitudes “model”, obtenues par ajustement d’un profil. On observe un comportement différent de celui de la Fig. 3.4, avec une moindre discrimination des types morphologiques.

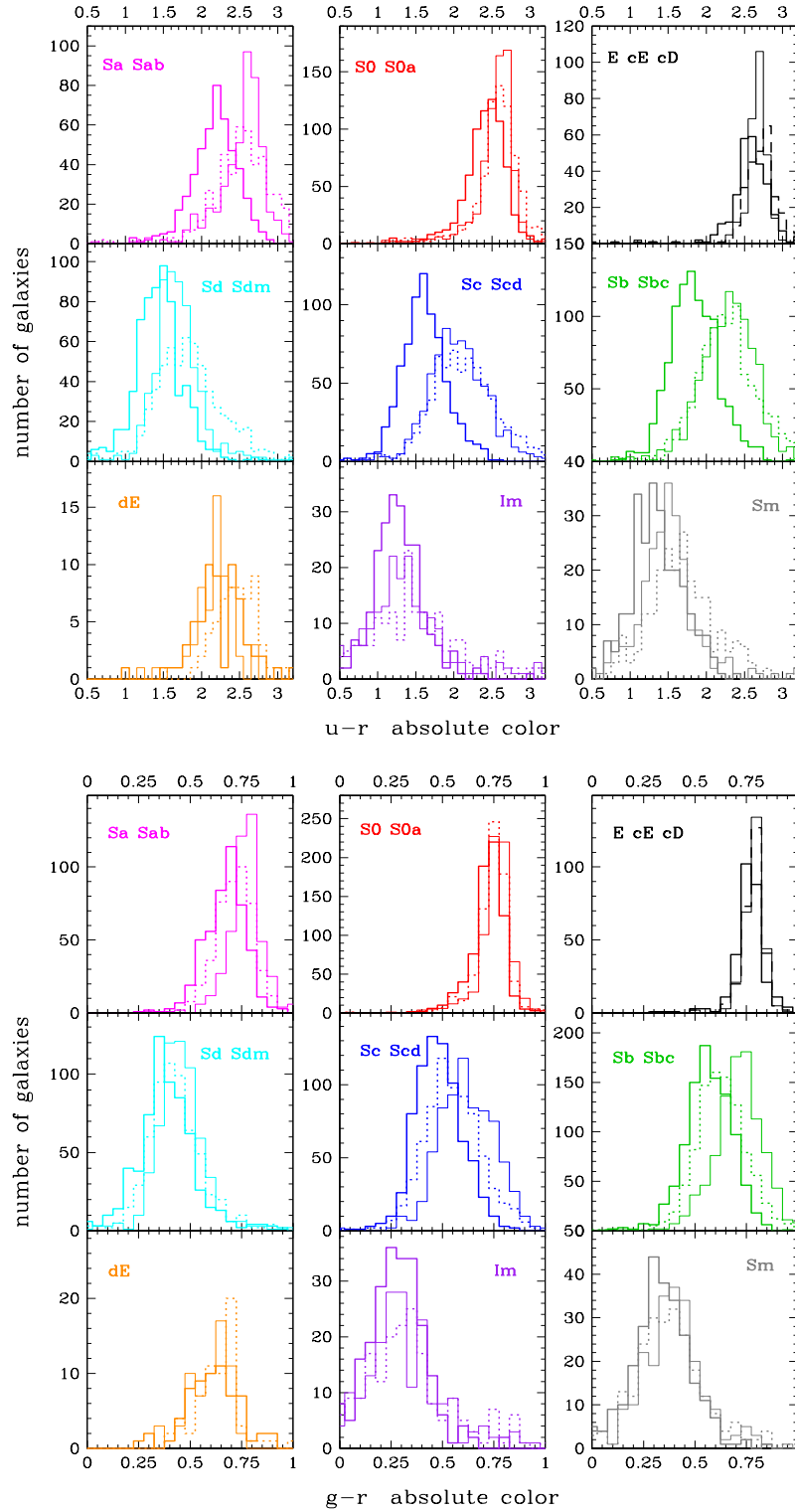


FIG. 3.6 – Les histogrammes de couleur $g-r$ pour les différents types morphologiques du catalogue EFIGI et les différentes magnitudes examinées : en trait plein et épais, les magnitudes obtenues par ajustement de modèles bulbe+disque de SExtractor; en trait plein fin, les magnitude “model” du SDSS DR7; en trait pointillés, les magnitudes “Petrosian” du SDSS DR7.

obtenues avec SExtractor dans la Fig. 3.4. La séquence de couleurs des lenticulaires semble cependant plus étroite lorsqu'on utilise les magnitudes “model” du SDSS, plutôt que les magnitudes SDSS “Petrosian” ou les magnitudes SExtractor. On remarque en outre, un nombre plus faible de galaxies Im dans les deux panneaux de la Fig. 3.5 en comparaison avec la Fig. 3.4. Il en résulte des séquences couleur-magnitude plus “compactes” ou “tronquées” lorsqu'on utilise les magnitudes SDSS, et tout particulièrement pour les magnitudes “model”.

Afin de quantifier les différences entre les séquences couleur-magnitudes montrées dans les Figs. 3.4 et 3.5, on montre dans la Fig. 3.6 les histogrammes de couleurs $u - r$ pour les différents regroupements de types morphologiques considérés, et pour les trois différents types de magnitudes (SExtractor “MODEL”, SDSS “model” et SDSS “Petrosian”). On constate un rougissement de ~ 0.5 des distribution couleurs pour tous les types de Sa-Sab à Sc-Scd. On observe par ailleurs des nombres totaux de galaxies par types qui sont moindres dans les histogrammes utilisant les couleurs SDSS par rapport aux couleurs SExtractor; l'effet est présent non seulement pour les types Im, mais aussi pour les types Sb-Sbc et Sc-Scd, et pour les types Sd-Sdm et Sm avec les magnitudes “Petrosian” (mais pas avec pour magnitudes “model”). Ces galaxies manquantes sont les galaxies morcellées par la chaîne de traitement du relevé SDSS, comme décrit dans la Sect. 3.1. Ces divers résultats seront publiés dans de Lapparent & Bertin (2011a, en préparation).

3.3 Comparaison avec les types spectro-photométriques

Bien que la spectroscopie du SDSS soit disponible pour 3136 des galaxies du catalogue EFIGI, celle-ci n'est pas utilisable pour contraindre le contenu stellaire des objets, car les galaxies d'EFIGI sont des objets proches et par conséquent étendus bien au delà des 2 secondes d'arc des fibres utilisées pour la spectroscopie (voir Sect. 3.1). Il est par conséquent nécessaire d'utiliser la photométrie des galaxies pour déterminer les types spectraux.

J'ai ainsi utilisé à nouveau le code ZPEG afin de calculer les types spectro-photométriques des galaxies d'EFIGI, en utilisant les magnitudes SExtractor “MODEL”. J'utilise les mêmes scénarios et la même contrainte d'âge à $z = 0$ que dans la Sect. 4.1; la limite supérieure et le pas en décalage spectral sont cependant modifiés à 0.1 et 0.0005 resp. J'exclus de ce calcul les ~ 200 galaxies d'EFIGI ayant une contamination importante (attribut `Contamination` ≤ 0.5), et j'utilise les décalages vers le rouge spectroscopiques, afin d'obtenir le meilleur ajustement des scénarios.

Je montre dans la Fig. 3.7 la comparaison entre les types morphologiques et les types spectro-photométriques fournis par ZPEG, parmi: E, S0, Sa, Sb, Sbc, Sc, Sd, Im, et Starburst. Dans le graphe, on attribue à chacun de ces scénarios le type morphologique numérique T correspondant, sauf pour le scénario Starburst, qui est placé à $T = 10$, correspondant au type morphologique Im. On remarque une grande dispersion des types, avec des effets systématiques, plaçant les moyennes et médianes de types ZPEG au dessous des types morphologiques.

Le décalage systématique des types ZPEG par rapport aux types morphologiques est causé principalement par l'inclinaison des galaxies. Celle-ci est indiquée par des symboles de couleurs différentes selon les niveaux de l'attribut, 0 correspondant à une galaxie de face, et 4 à une galaxie vue par la tranche. Par exemple les galaxies de type morphologique Sa ($T = 1$) sont classées principalement en E, S0 et même E quand l'inclinaison augmente. J'attribue cet effet au rougissement interne des galaxies par les poussières qu'elles contiennent, et qui varie avec l'inclinaison. Driver et al. (2007) ont montré à partir des 10 095 galaxies du catalogue observé “Millennium” (à ne pas confondre avec les simulations numériques “Millennium”) que les poussières contenues dans les disques des galaxies atténuent les magnitudes B des disques et des bulbes associés jusqu'à 1 et 2.5 mag. resp. en fonction de leur inclinaison; 1/3 de la lumière émise par les disques dans la bande B , et 2/3 de celle émise par les bulbes serait absorbée par les poussières. On observe aussi un affaiblissement des magnitudes absolues des galaxies du catalogue EFIGI, atteignant 0.5 magnitude pour les galaxies spirales précoces (Sa-Scd) dans les bandes u et g , et pouvant atteindre atteignant 1 à 2 mag. pour les disques de ces galaxies.

On voit dans la Fig. 3.7 que cet effet de rougissement est important jusqu'aux types morphologiques Sb, correspondant à un étalement jusqu'au type ZPEG E, et s'amointrit pour les galaxies de type Sc ou

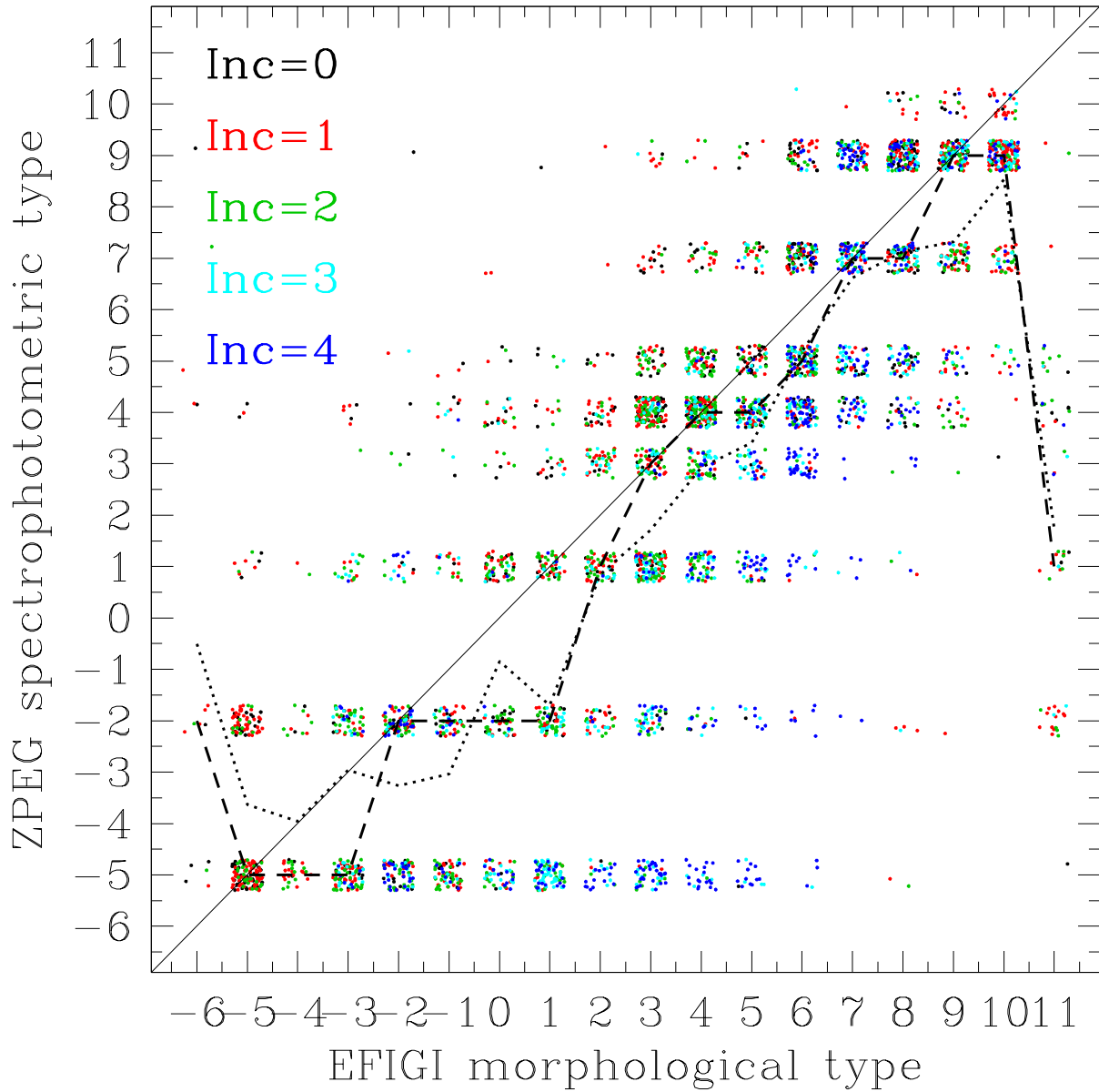


FIG. 3.7 – Comparaison des types spectraux morphologiques du catalogue EFIGI avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie SExtractor dans les bandes ugriz, et en utilisant les décalages vers le rouge spectroscopiques. La ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types morphologique, et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points, et la couleur des points dépend de l'inclinaison sur le ciel ou de l'élongation (pour les type E, cE, cD, Im et cE) de la galaxie. Les types morphologiques numériques correspondent à cE (-6), E (-5), cD (-4), S0⁻ (-3), S0 (-2), S0⁺ (-1), S0a (0), Sa (1), Sab (2), Sb (3), Sbc (4), Sc (5), Scd (6), Sd (7), Sdm (8), Sm (9), Im (10), dE (11).

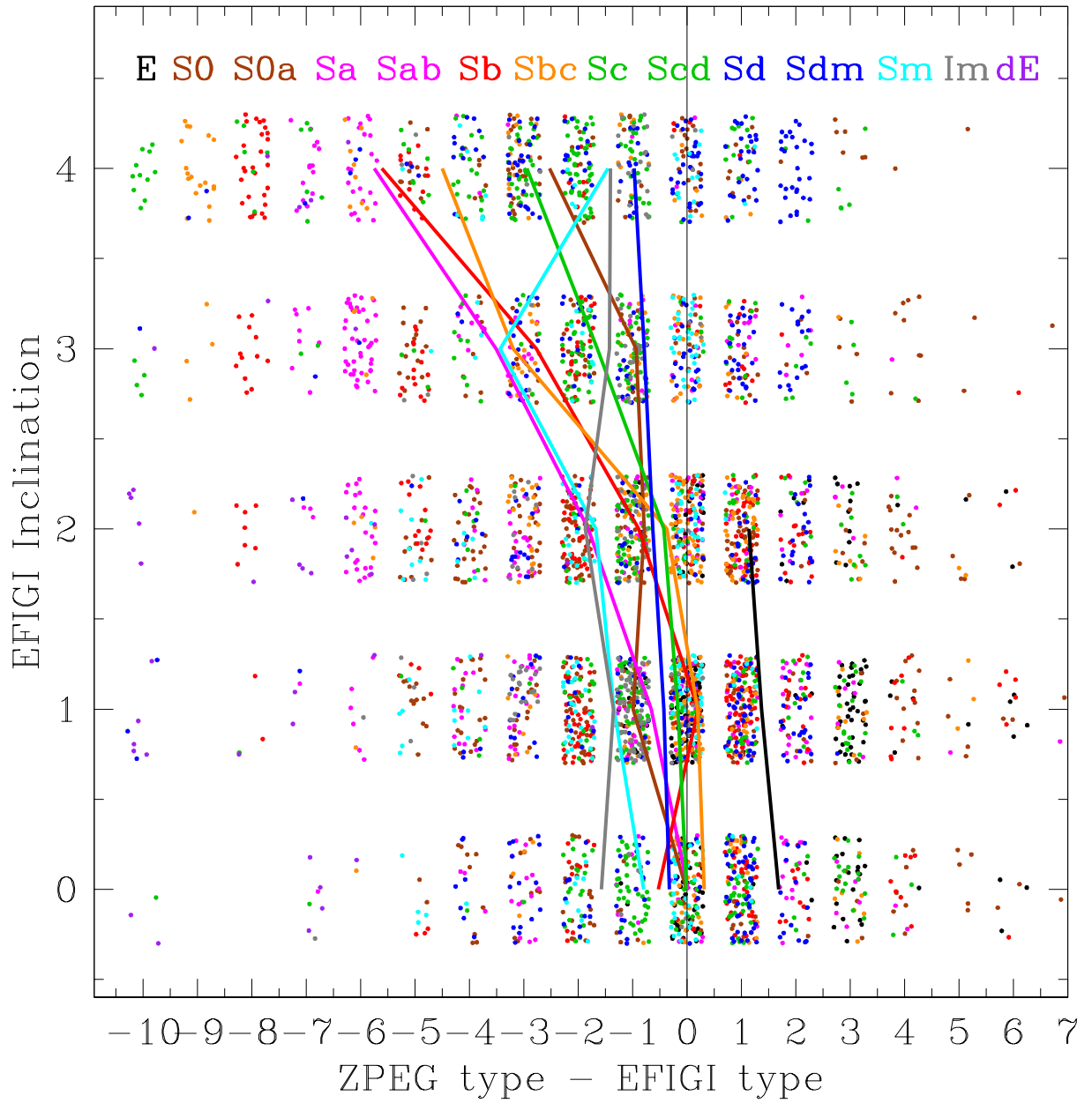


FIG. 3.8 – Comparaison des types spectraux morphologiques du catalogue EFIGI avec les types spectro-photométriques mesurés par ZPEG à partir de la photométrie SExtractor dans les bandes ugriz, et en utilisant les décalages vers le rouge spectroscopiques. La ligne pointillée montre le type spectro-photométrique moyen mesuré pour chaque types morphologique, et la ligne tiretée le type médian. Les valeurs entières des types sont dispersées afin de faire apparaître la densité de points, et la couleur des points dépend de l'inclinaison sur le ciel ou de l'élongation (pour les type E, cE, cD, Im et cE) de la galaxie. Les types morphologiques numériques correspondent à cE (-6), E (-5), cD (-4), S0⁻ (-3), S0 (-2), S0⁺ (-1), S0a (0), Sa (1), Sab (2), Sb (3), Sbc (4), Sc (5), Scd (6), Sd (7), Sdm (8), Sm (9), Im (10), dE (11).

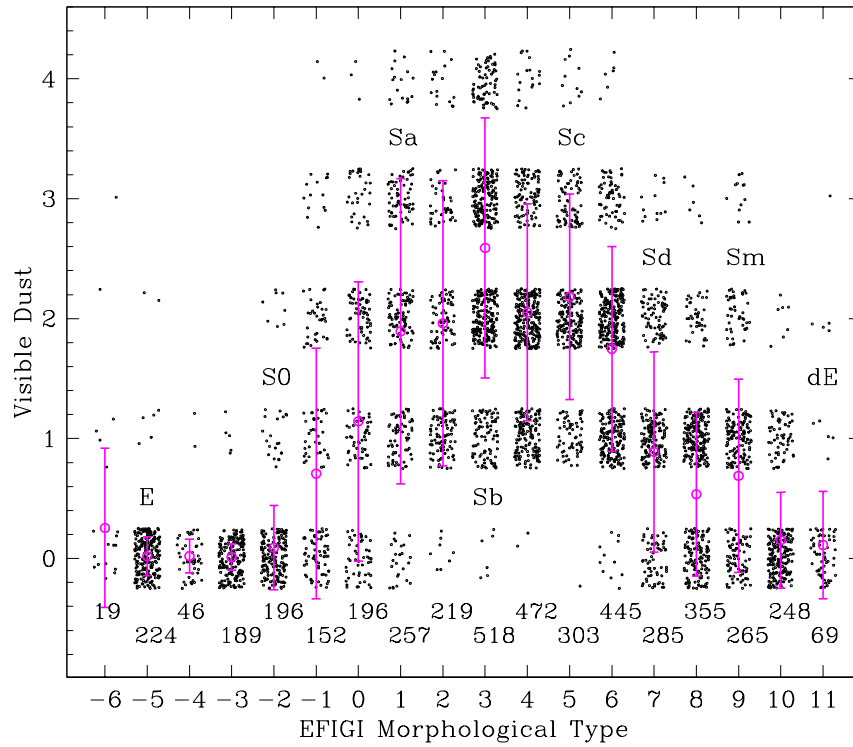


FIG. 3.9 – Distribution de l’attribut caractérisant la quantité de “poussière visible” dans les galaxies du catalogue EFIGI. La valeur 0 correspond à aucune poussière visible, et la valeur 4 à la quantité maximale détectée dans l’échantillon.

plus tardif. On remarque aussi que le type dE ne figurant pas parmi les scénarios utilisés, ces galaxies sont classées comme des types S0, Sa, Sb ou Sbc, suivant l’élongation des objets.

La Fig. 3.8 montre quantitativement le décalage entre le type ZPEG et le type morphologique en fonction de l’attribut d’inclinaison: pour tous les types de lenticulaires et pour toutes les spirales jusqu’à Scd, on voit un accroissement de la différence de type vers les valeurs négatives pour les plus grandes inclinaisons, avec un effet le plus marqué pour les types Sa, Sab et Sb qui sont les plus riches en poussière. La Fig. 3.9 montre la répartition des types EFIGI selon les 5 valeurs de l’attribut caractérisant la quantité de “poussière visible”. En revanche, pour les types E, Sd, Sdm, Sm et Im, l’attribut *Inclinaison* mesure l’élongation des objets (rapport d’axes), et la différence entre les types morphologiques et la Fig. 3.8 spectrophotométrique ne montre pas de variation avec l’élongation.

3.4 Fonctions de luminosité par type

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology IV. Luminosity functions along the Hubble sequence”, **de Lapparent, V.**, Bertin, E., Baillard, B., en préparation.

Le catalogue EFIGI offre l’opportunité sans précédent de mesurer les fonctions de luminosité par type de Hubble à partir d’un grand échantillon statistique. En effet, nous avons vu dans les Sects. 5.3 et 5.5 que ces fonctions ne sont connues que dans l’Univers local (dans les amas de la Vierge et du Centaure), pour un petit nombre de galaxies, et à partir de magnitudes photographiques.

Le panneau de gauche de la Fig. 3.10 montre la fonction de luminosité obtenue pour l’ensemble de l’échantillon EFIGI, tous types confondus, au moyen des magnitudes “MODEL” de SExtractor. J’utilise

ici la méthode de Efstathiou et al. (1988) dite “Step-Wise Maximum-Likelihood”, qui corrige des inhomogénéités spatiales prenant en compte uniquement des rapports de nombre de galaxies dans un même volume. C’est une méthode itérative qui converge pour l’échantillon EFIGI en 10 à 50 itérations, selon la taille du sous-échantillon considéré. Je corrige en outre de l’incomplétude en magnitude apparente, qui décroît rapidement à $g > 14$, en interpolant le comportement en loi de puissance des comptages de galaxies : dans l’intervalle $10 \leq g \leq 14$, les comptages par pas de 0.2 mag. sont bien ajustés par la fonction $dN(g) = 10^{0.401g-3.061} dg/0.2$.

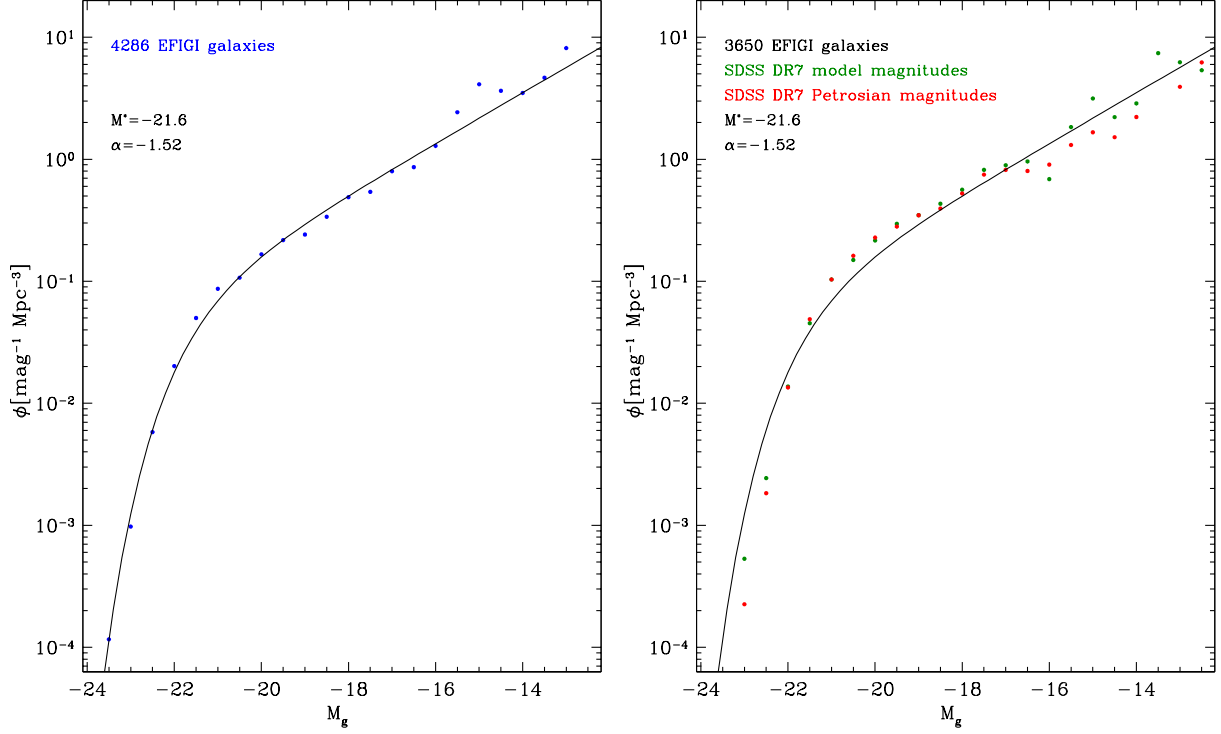


FIG. 3.10 – *A gauche, et en bleu : la fonction de luminosité pour l’ensemble du catalogue EFIGI dans la bande g, avec les magnitudes “MODEL” de SExtractor, ainsi que la fonction de Schechter ajustée (les paramètres de cette fonction, et le nombre de galaxies utilisées sont indiqués dans le graphe). A droite, les fonctions de luminosité globales obtenues avec les magnitude SDSS DR7 “model” (en vert) et “Petrosian” (en rouge), comparées avec la loi de Schechter ajustée dans le panneau de gauche.*

La fonction de luminosité totale de l’échantillon EFIGI est proche d’une fonction de Schechter (1976), dont le formalisme est

$$\phi(L)dL = \phi^* \left(\frac{L}{L^*} \right)^\alpha e^{-\frac{L}{L^*}} d\left(\frac{L}{L^*} \right), \quad (3.1)$$

où L^* est la fonction de luminosité caractéristique. Si l’on ré-écrit cette formule en terme de magnitude on obtient :

$$\begin{aligned} \phi(M)dM &= 0.4 \ln 10 \phi^* e^{-X} X^{\alpha+1} dM, \\ \text{avec} \quad X &\equiv \frac{L}{L^*} = 10^{0.4(M^*-M)}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

où M^* est la magnitude caractéristique.

Les paramètres de la fonction de Schechter ajustée à la fonction de luminosité totale du catalogue EFIGI (panneau de gauche, Fig. 3.10), sont $M^* = -21.6$ et $\alpha = -1.52$; des mesures de “bootstrap”, Ling et al. 1986, devront être effectuées afin d’obtenir les marges d’erreur sur les points de mesure de la méthode SWML et sur les ajustements de Schechter. Par comparaison, on montre dans le panneau de droite de la Fig. 3.10 les fonctions de luminosité totales obtenues lorsqu’on utilise pour les galaxies

EFIGI les magnitudes “model” et “Petrosian” du par le catalogue SDSS DR7. On observe par rapport à la fonction de Schechter ajustée dans le panneau de gauche un manque de galaxies aux magnitudes brillantes et aux magnitudes faibles, que ce soit pour les magnitudes “model” ou “Petrosian” du SDSS. Ces différences sont causées par les erreurs de photométrie décrites dans Sect. 3.1 : le flux des galaxies brillantes est sous-estimé, et le morcellement des galaxies faibles (et donc tardives) tend à les exclure de l'échantillon.

L'ajustement d'une fonction de Schechter à la fonction de luminosité globale calculée avec les magnitudes “model” du SDSS (panneau de droite) donne $M^* = -21.0$ et $\alpha = -1.39$, soit un décalage en magnitude caractéristique de 0.6 magnitude et une pente plus plate de 0.13. Ainsi les erreurs de photométrie des du relevé SDSS ont des implications sur les mesures statistiques qui en sont déduites.

En outre, on remarque que Blanton et al. (2001) avaient obtenu dans la bande g à partir de $\sim 10\,000$ galaxies du relevé SDSS à $z \sim 0.01 - 0.2$, un M^* plus faible d'une magnitude et demi (-20.04 ± 0.04) et une pente encore plus plate ($\alpha = 1.26 \pm 0.05$). Les mesures plus récentes publiées par Blanton et al. (2003) pour $\sim 150\,000$ galaxies du catalogue SDSS indiquent une pente encore plus plate de $\alpha = -0.89 \pm 0.03$, et une magnitude de référence $M^* = -19.39 \pm 0.02$, mais qui ne peut pas être comparée directement avec les fonctions de luminosité calculées ici pour le catalogue EFIGI : ces mesures furent obtenues dans les filtres décalés à $z = 0.1$. Blanton et al. (2003) attribut les différences avec les mesures précédentes de Blanton et al. (2001) aux effets d'évolution liées à ces différents référentiels en décalage vers le rouge.

Il est étonnant qu'il y ait de telles différences avec la fonction de luminosité totale du catalogue EFIGI. L'essentiel des galaxies utilisées dans les mesures de Blanton et al. (2001) et Blanton et al. (2003) ont des magnitudes $r \gtrsim 17$, au delà des magnitudes de l'échantillon EFIGI pour lesquelles nous avons mis en évidence les problèmes de photométrie (Sect. 3.1). Cependant, les écarts vont dans le même sens, et les biais de la photométrie pourraient expliquer une partie de ce qui était interprété par ces auteurs comme des effets d'évolution.

Lorsqu'on calcule les fonctions de luminosité séparément pour les différents types morphologiques, des corrélations marquées apparaissent entre les formes des fonctions et le type de Hubble. Celles-ci sont montrées dans le panneau de gauche de la Fig. 3.11. A noter qu'à ce stade de l'analyse, la normalisation absolue des fonctions de luminosité de l'échantillon EFIGI n'ayant pas été effectuée, seules les formes des différentes courbes peuvent être comparées.

Les fonctions de luminosité par type affichent une diminution des magnitudes caractéristiques le long de la séquence de Hubble. En outre, on observe pour les types E, S0 et les spirales Sa à Sc-Scd des fonctions de luminosité en cloche, c'est-à-dire qui décroissent à forte et faible magnitude. En revanche, pour les spirales Sd et plus tardives, ainsi que les types Im et dE, les fonctions de luminosité sont croissantes aux faibles magnitudes. La forme des fonctions obtenues est en accord avec les fonctions prédites à partir des mesures locales (de Lapparent 2003), et démontre l'intérêt de faire des mesures par type morphologique. C'est la première fois que ces fonctions sont mise en évidence à partir d'un relevé systématique avec photométrie CCD.

Par comparaison, on montre dans le panneau de droite de la Fig. 3.11 les fonction de luminosité par type EFIGI obtenues en utilisant les magnitudes “model” du SDSS DR7. On observe pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu'à Scd ;

- le déficit de galaxies brillantes qui se traduit par un chute de la fonction de luminosité aux magnitudes brillantes localisée à des valeurs ~ 0.5 mag. moins brillantes ;
- le réhaussement du côté des magnitudes faibles à cause de la contamination par les objets morcellés et les objets dont le fond de ciel est surestimé (voir Sect. 3.1)

Ces derniers effets causent l'extension aux faibles magnitudes des fonctions de luminosité pour les galaxies de types Sd-Sdm, Sm, Im et dE, lorsqu'on utilise les magnitudes SDSS (panneau de droite de la Fig. 3.11). L'absence de signal aux magnitudes plus brillantes que -18.5 pour les galaxies Irrégulières est particulièrement frappante dans le panneau de droite, alors que des objets jusqu'à -20.5 , soit 2 magnitudes plus brillantes sont détectées lorsqu'on utilise les magnitudes “MODEL” de SExtractor (panneau de gauche de la Fig. 3.11).

J'examine maintenant les biais dans les mesures des fonctions de luminosité causés par le mélange des types morphologiques lorsqu'on effectue une séparation par couleur ou par type spectral, et que j'avais

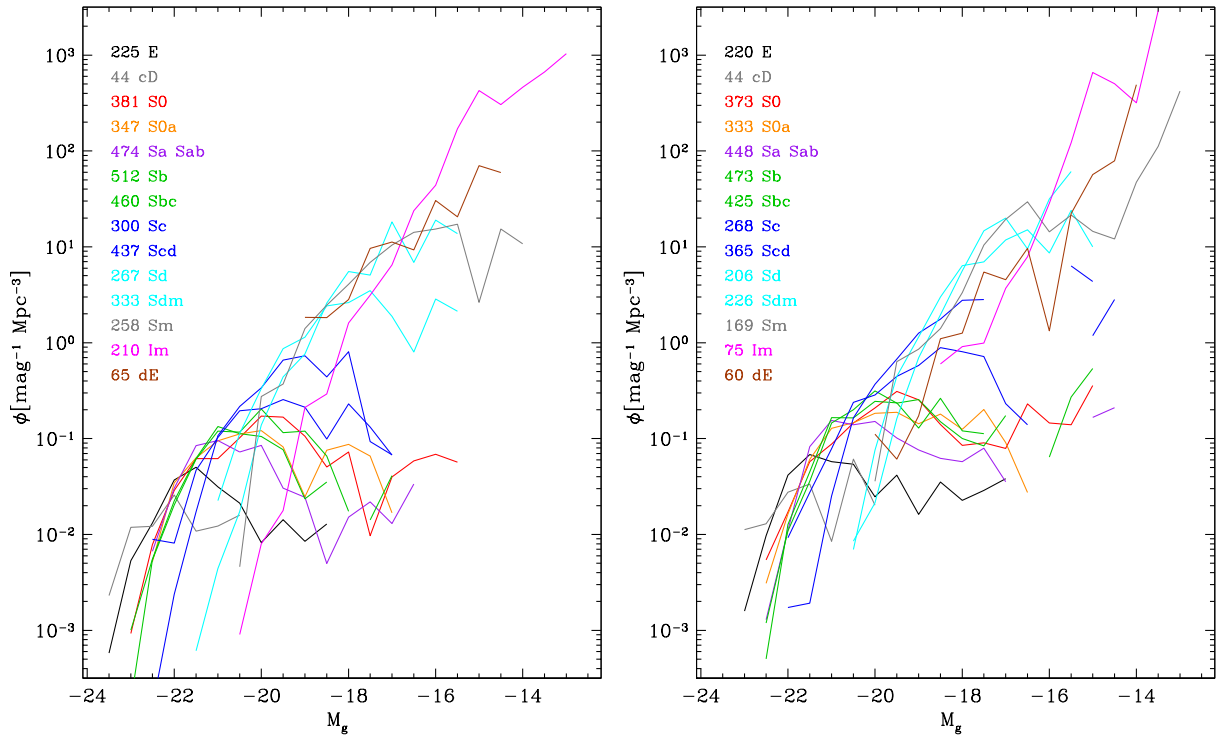


FIG. 3.11 – *A gauche* : les fonctions de luminosité pour les différents types morphologiques du catalogue EFIGI dans la bande g du relevé SDSS (magnitudes “MODEL” de SExtractor) ; on observe la décroissance de la luminosité caractéristique vers les types plus tardifs, le comportement en cloche pour les galaxies spirales jusqu’à Scd, et la croissance aux faibles luminosités pour les types les plus tardifs. *A droite* : la même figure en utilisant les magnitudes “model” du SDSS DR7.

pointé dans les Sects. 5.3 et 5.5. Pour cela, je montre dans le panneau de gauche de la Fig. 3.12 les fonctions obtenues pour les 5 intervalles de couleur absolue $M_g - M_r$ utilisés par Blanton et al. (2001). La décroissance à faible magnitude des fonctions de luminosité pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales jusqu’à Sc disparaît : même lorsqu’on considère les 2 intervalles de magnitude les plus rouges. En outre, seule la fonction de luminosité des galaxies les plus bleues exhibe un affaiblissement des magnitudes les plus brillantes détectées. Mais celles-ci sont 1 magnitude plus brillantes (~ -21.5) que dans la fonction de luminosité des galaxies irrégulières (~ -20.5), montrée dans la Fig. 3.11.

On peut aisément expliquer ce comportement en examinant le panneau de droite de la Fig. 3.12, montrant comment les types morphologiques des galaxies d’EFIGI se répartissent dans les 5 intervalles de couleur considérés dans le panneau de gauche. L’intervalle de couleur le plus bleu, contient non seulement des galaxies irrégulières, mais aussi des galaxies de type Sm et Sdm. Quant à l’intervalle suivant en couleur, $0.25 \leq M(g-r) \leq 0.42$, il contient des nombres équivalents de galaxies de types Im, Sm et Sdm, et un peu moins de types Sd et Scd. L’intervalle central de couleur $0.42 \leq M_g - M_r \leq 0.58$ contient tous les types depuis les Sb jusqu’aux dE, alors que le panneau de gauche de la Fig. 3.12 indique des fonctions de luminosité distinctes pour ces différents types. L’intervalle $0.58 \leq M_g - M_r \leq 0.74$ est le plus contaminé, car il contient des galaxies de *tous* les types morphologiques. Le contenu en types morphologiques de l’intervalle de couleur le plus rouge, $0.74 \leq M_g - M_r \leq 1.30$, diffère par la très faible contribution des types Sd à dE, contient les galaxies les plus rouges parmi les types E à Scd. Ainsi, les différents intervalles de couleurs scindent les différents types morphologiques par couleur, sans parvenir à séparer les types individuels. On remarque que même l’intervalle de couleur le plus rouge ne parvient pas mesurer la fonction de luminosité des galaxies elliptiques, qui s’interrompt à $M_g \simeq -18.5$ dans la Fig. 3.11, alors qu’on observe une extension jusqu’à $M_g \simeq -16$ pour la composante la plus rouge dans la Fig. 3.12.

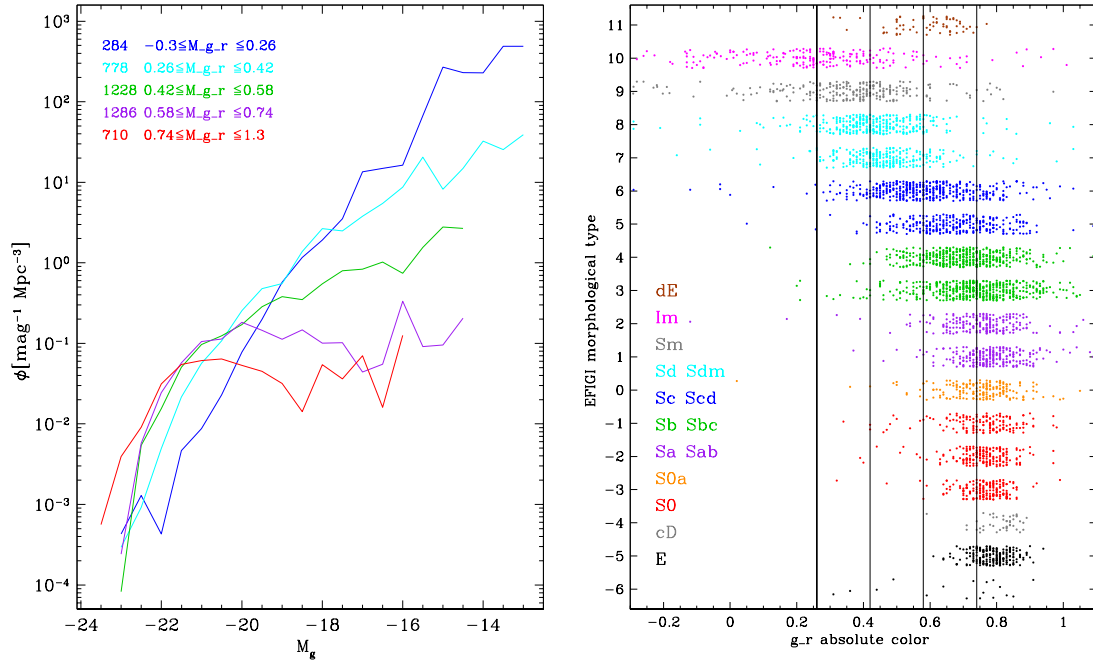


FIG. 3.12 – A gauche : les fonctions de luminosité pour les différents intervalles de couleurs absolue $g - r$ indiqués (utilisant les magnitudes “MODEL” de SExtractor). A droite : la distribution des types morphologiques pour les cinq intervalles de couleurs, avec le même code de couleur par type que dans la Fig. 3.11. On observe le mélange des types morphologiques et la perte d’information qui en résulte sur les fonctions de luminosité intrinsèques.

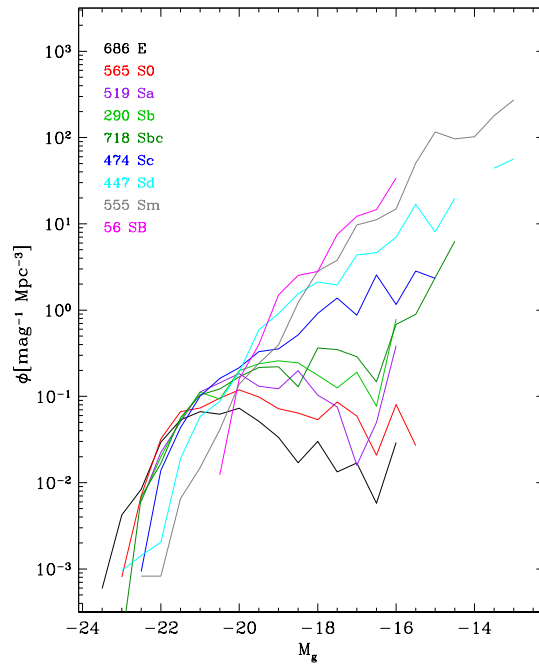


FIG. 3.13 – Les fonctions de luminosité pour les différents types spectro-photométriques calculés par ZPEG pour les galaxies du catalogue EFIGI.

On obtient des résultats similaires lorsqu'on calcule les fonctions de luminosité par type spectro-photométrique calculés avec ZPEG. Ces fonctions sont montrées dans la Fig. 3.13, et l'on observe des effets similaires à ceux de la Fig. 3.12. La dispersion entre les types spectro-photométriques et les types morphologiques est visible dans la Fig. 3.7 (Sect. 3.3). Tous les résultats énoncés dans cette Sect. sont aussi constatés dans les quatre autres filtres du SDSS. L'ensemble des résultats sera publié dans de Lapparent & Bertin (2011b, en préparation).

3.5 Couleurs des bulbes et disques

Article: “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology III. Disk and bulge bi-modality along the Hubble sequence”, **de Lapparent, V.**, Bertin, E., en préparation.

Les décompositions des profils d'environ 10 095 galaxies avec $B < 20$ dans le catalogue “Millennium” avaient suggéré que l'apparente bi-modalité est le résultat d'une nette séparation entre les couleurs des bulbes et des disques des galaxies (Allen et al. 2006). Mais cette analyse manque de robustesse dans l'ajustement des profils à cause de dégénérescences entre les composantes (en partie liées au choix peu contraignant d'un profil de Sérsic pour les bulbes), ainsi que de l'absence d'une classification morphologique précise (galaxies classées en E/S0, Sabc, et Sd/Irr/Pec).

Grâce à la qualité des ajustements de profil et le niveau de précision du type de Hubble et des attributs morphologiques pour le catalogue EFIGI, nous avons pu établir les séquences couleur-magnitude pour les bulbes et les disques de la majorité des objets. Dans les Figs. 3.14 et 3.15 on voit clairement le comportement distinct des bulbes qui ont majoritairement des couleurs proches de celles des galaxies elliptiques, alors que les disques décrivent tout l'intervalle de couleur depuis la couleur rouge des elliptiques, jusqu'à la couleur très bleue des irrégulières.

Ces résultats contrastent de façon marquée avec les résultats de Balcells & Peletier (1994), qui trouvèrent un bleuissement des bulbes de 18 spirales précoces (non affectées par l'extinction) par rapport aux couleurs des elliptiques. En ajustant des profils dans la partie excluant la bande de poussière pour 30 galaxies spirales précoces inclinées, Peletier & Balcells (1996) mesurèrent des couleurs similaires pour les bulbes et disque des ces galaxies. Par l'ajustement des profils des 10 095 galaxies du catalogue “Millennium” par un bulbe de type “Sérsic” ajouté à un disque exponentiel, au moyen de GIM2D (Simard 1998), Cameron et al. (2009) obtinrent une étonnante corrélation entre les couleurs $u - r$ des bulbes et disques sur un intervalle de 2 magnitudes, après une correction de l'atténuation par la poussière. Les différences avec les mesures effectuées sur le catalogue EFIGI illustrent la difficulté des ajustements de profils, et l'importance d'une bonne prise en compte de la réponse impulsionnelle.

Il est intéressant de remarquer que dans la Fig. 3.14 les bulbes des types Sb, Sbc, Sc, Scd montrent un rougissement par rapport à la couleur de référence ($g - r = 0.75$). On remarque que ces types présentant une forte quantité de poussière, comme indiqué dans la Fig. 3.9 (voir Sect. 3.3) au moyen de l'attribut EFIGI *Visible Dust*. L'effet est cependant présent lorsque l'on examine séparément les galaxies de ce type avec peu ou pas de poussière visible, car la poussière évaluée par l'attribut EFIGI est celle du disque. Cependant, on observe dans la Fig. 3.16 que ce rougissement des bulbes augmente pour les galaxies présentant un rapport Bulbe/Total décroissant. Cela est peut-être cohérent avec le fait que le rougissement par la poussière s'accompagne d'une extinction. Mais il est aussi possible que les détails de la modélisation bulbe+disque pour les galaxies ayant une faible contribution du bulbe aient un impact sur les couleurs calculées pour les bulbes dans ces objets. Enfin, on remarque que les bulbes des galaxies de type Sbc et plus tardives sont principalement des “pseudo-bulbes”, qui peuvent avoir des profils exponentiels et qui auraient été formés par accrétion lente de matière provenant du disque, plutôt que par relaxation violente selon le modèle des elliptiques massives (Kormendy & Kennicutt 2004). L'ensemble de ces considérations appelle à poursuivre cette étude en utilisant des profils autres que la loi “de Vaucouleurs” pour les bulbes. Ces résultats seront approfondis et discutés dans de Lapparent & Bertin (2011a, en préparation).

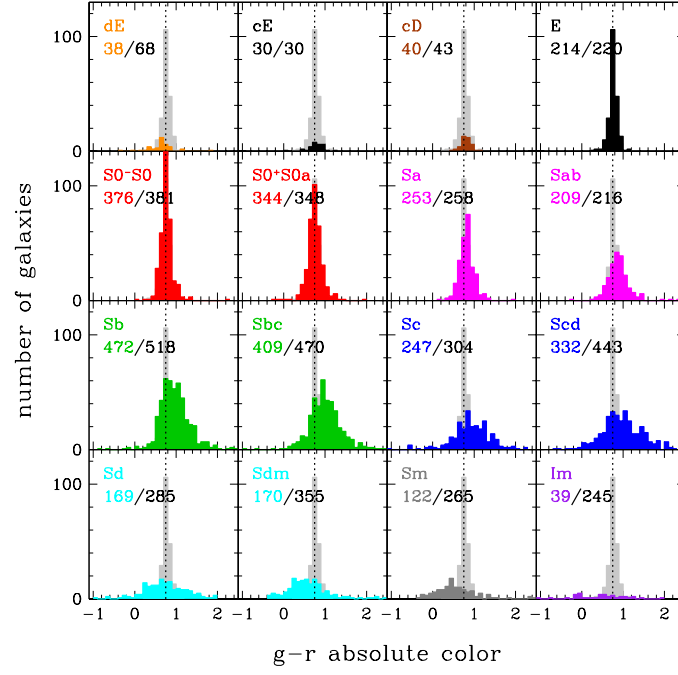


FIG. 3.14 – Distributions des couleurs $g-r$ pour les bulbes des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil en $r^{1/4}$ convolué avec la réponse impulsionnelle, en fonction du type de Hubble. L'histogramme grisé réplique celui obtenu en haut à droite pour les galaxies elliptiques.

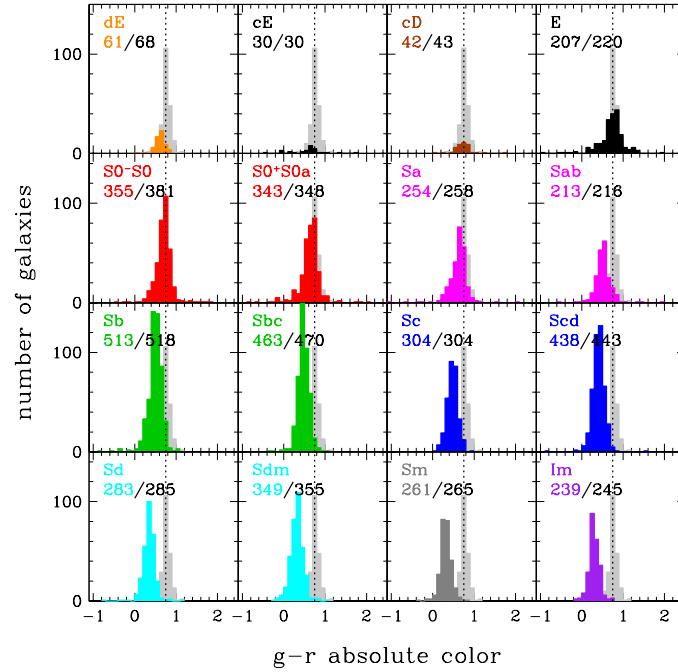


FIG. 3.15 – Distributions des couleurs $g-r$ pour les disques des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil exponentiel convolué avec la réponse impulsionnelle, en fonction du type de Hubble. L'histogramme grisé réplique celui obtenu dans la Fig. 3.14 pour les bulbes des galaxies elliptiques.

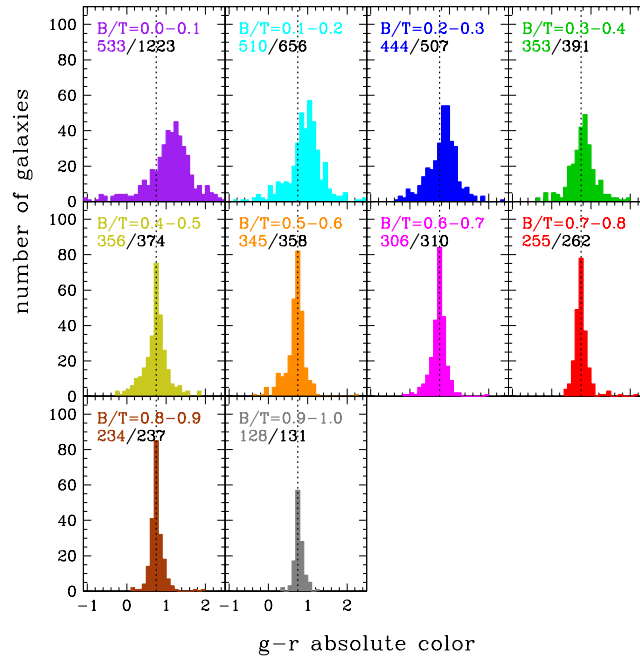


FIG. 3.16 – Distributions des couleurs $g - r$ pour les bulbes des galaxies du catalogue EFIGI, mesurées par l'ajustement d'un profil en $r^{1/4}$ convolué avec la réponse impulsionnelle, en fonction du rapport Bulbe/Total. La ligne verticale en pointillés indique dans chaque cadran la couleur médiane des galaxies elliptiques (avec un rapport Bulbe/Total > 0.9).

Références

- Abazajian, K. N., Adelman-McCarthy, J. K., Agüeros, M. A., et al. 2009, *ApJS*, 182, 543
- Abell, G. O. 1959, Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific, 8, 121
- Abraham, R. G., Valdes, F., Yee, H. K. C., & van den Bergh, S. 1994, *ApJ*, 432, 75
- Abraham, R. G., van den Bergh, S., & Nair, P. 2003, *ApJ*, 588, 218
- Allen, P. D., Driver, S. P., Graham, A. W., et al. 2006, *MNRAS*, 371, 2
- Baillard, A. 2008, Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies (Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications)
- Baillard, B., Bertin, E., de Lapparent, V., et al. 2011, *A&A* in press
- Balcells, M. & Peletier, R. F. 1994, *AJ*, 107, 135
- Baldry, I. K., Balogh, M. L., Bower, R. G., et al. 2006, *MNRAS*, 373, 469
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., et al. 2004, *ApJ*, 600, 681
- Barazza, F. D., Binggeli, B., & Jerjen, H. 2002, *A&A*, 391, 823
- Barazza, F. D., Jogee, S., & Marinova, I. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 396, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, ed. J. G. Funes & E. M. Corsini, 351–+
- Bertin, E. 2010, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX*
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, *A&AS*, 117, 393
- Blanton, M. R., Dalcanton, J., Eisenstein, D., et al. 2001, *AJ*, 121, 2358
- Blanton, M. R., Eisenstein, D., Hogg, D. W., Schlegel, D. J., & Brinkmann, J. 2005, *ApJ*, 629, 143
- Blanton, M. R., Hogg, D. W., Bahcall, N. A., et al. 2003, *ApJ*, 592, 819
- Buta, R. 1995, *ApJS*, 96, 39
- Buta, R., Laurikainen, E., Salo, H., Block, D. L., & Knapen, J. H. 2006, *AJ*, 132, 1859
- Buta, R. J., Corwin, H. G., & Odewahn, S. C. 2007, *The de Vaucouleurs Atlas of Galaxies*, ed. Buta, R. J., Corwin, H. G., & Odewahn, S. C. (Cambridge University Press)
- Cameron, E., Driver, S. P., Graham, A. W., & Liske, J. 2009, *ApJ*, 699, 105
- Conselice, C. J. 1997, *PASP*, 109, 1251
- Conselice, C. J. 2003, *ApJS*, 147, 1
- Conselice, C. J. 2006, *MNRAS*, 373, 1389
- Conselice, C. J., Bershadsky, M. A., & Jangren, A. 2000, *ApJ*, 529, 886
- Damjanov, I., McCarthy, P. J., Abraham, R. G., et al. 2009, *ApJ*, 695, 101
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Baillard, B., & Bertin, E. 2011, *A&A* in press
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., & Corwin, H. G. 1976, 2nd reference catalogue of bright galaxies containing information on 4364 galaxies with reference to papers published between 1964 and 1975 (University of Texas Monographs in Astronomy, Austin: University of Texas Press, 1976)
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, H. G., et al. 1991, *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies (Volume 1-3, XII, 2069 pp. 7 figs.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York)*
- Debattista, V. P., Mayer, L., Carollo, C. M., et al. 2006, *ApJ*, 645, 209
- Driver, S. P., Popescu, C. C., Tuffs, R. J., et al. 2007, *MNRAS*, 379, 1022
- Efstathiou, G., Ellis, R. S., & Peterson, B. A. 1988, *MNRAS*, 232, 431

- Hogg, D. W., Blanton, M., Strateva, I., et al. 2002, *AJ*, 124, 646
- Kormendy, J. 1979, *ApJ*, 227, 714
- Kormendy, J. & Kennicutt, Jr., R. C. 2004, *ARA&A*, 42, 603
- Ling, E. N., Barrow, J. D., & Frenk, C. S. 1986, *MNRAS*, 223, 21P
- Lintott, C. J., Schawinski, K., Slosar, A., et al. 2008, *MNRAS*, 389, 1179
- Lisker, T. 2008, *ApJS*, 179, 319
- Lisker, T., Grebel, E. K., & Binggeli, B. 2006, *AJ*, 132, 497
- Naim, A., Ratnatunga, K. U., & Griffiths, R. E. 1997, *ApJ*, 476, 510
- Nair, P. B. & Abraham, R. G. 2010, *ApJS*, 186, 427
- Parry, O. H., Eke, V. R., & Frenk, C. S. 2009, *MNRAS*, 396, 1972
- Paturel, G., Fouque, P., Bottinelli, L., & Gougouenheim, L. 1995, *VizieR Online Data Catalog*, 7119, 0
- Peletier, R. F. & Balcells, M. 1996, *AJ*, 111, 2238
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H. 2002, *AJ*, 124, 266
- Pérez, I. & Sánchez-Blázquez, P. 2011, *A&A*, 529, A64+
- Petrosian, V. 1976, *ApJ*, 209, L1
- Sandage, A. & Binggeli, B. 1984, *AJ*, 89, 919
- Sandage, A. & Tammann, G. A. 1981, *A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies* (Washington: Carnegie Institution, 1981, Preliminary version)
- Scannapieco, C., Gadotti, D. A., Jonsson, P., & White, S. D. M. 2010, *MNRAS*, 407, L41
- Schechter, P. 1976, *ApJ*, 203, 297
- Schombert, J. M., Pildis, R. A., Eder, J. A., & Oemler, Jr., A. 1995, *AJ*, 110, 2067
- Sheth, K., Elmegreen, D. M., Elmegreen, B. G., et al. 2008, *ApJ*, 675, 1141
- Simard, L. 1998, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 145, *Astronomical Data Analysis Software and Systems VII*, ed. R. Albrecht, R. N. Hook, & H. A. Bushouse, 108–+
- Simard, L., Willmer, C. N. A., Vogt, N. P., et al. 2002, *ApJS*, 142, 1
- Slosar, A., Land, K., Bamford, S., et al. 2009, *MNRAS*, 392, 1225
- Strateva, I., Ivezić, Ž., Knapp, G. R., et al. 2001, *AJ*, 122, 1861
- van den Bergh, S. 1998, *Galaxy Morphology and Classification*, ed. van den Bergh, S.
- van den Bergh, S. 2007, *AJ*, 134, 1508
- van den Bergh, S. 2008, *A&A*, 490, 97
- Yamauchi, C., Ichikawa, S., Doi, M., et al. 2005, *AJ*, 130, 1545

Quatrième partie

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le relevé ESO-Sculpteur

Je décris dans une première partie les divers résultats publiés concernant le relevé ESO-Sculpteur. Celui-ci a produit un catalogue photométrique (Arnouts et al. 1997) et un suivi spectroscopique (Bellanger et al. 1995) dans un pinceau étroit de l'Univers à $z \lesssim 0.6$. Ces données ont fourni la première cartographie des grandes structures à $z \simeq 0.5$ (Bellanger & de Lapparent 1995), montrant la même alternance de vides et feuillets qu'à faible décalage spectral. Par le soin apporté à la calibration en flux des spectres et aux mesures des décalages vers le rouge, nous avons obtenu une classification spectrale dont les corrections-K et magnitudes absolues résultantes permettent une séparation des différents groupes de galaxies géantes et naines. Nous avons ainsi mis en évidence les composantes géantes et naines des fonctions de luminosité des galaxies à $z \sim 0.5$, connues uniquement dans le groupe local (de Lapparent et al. 2003; de Lapparent 2003).

La connaissance détaillée des fonctions de luminosité a permis des analyses fines des distributions en magnitude et décalage spectral, ainsi que du regroupement spatial des galaxies. D'une part, nous avons pu montrer que l'excès de galaxies dans les comptages profonds est causée principalement par une évolution marquée des galaxies spirales tardives et Irrégulières (de Lapparent et al. 2004). Nous avons de surcroît effectué la première mesure des composantes géantes et naines dans la fonction de corrélation des galaxies à $z \sim 0.5$, et obtenu des indications sur la répartition relative des différents types de galaxies au sein des halos de matière noire (de Lapparent & Slezak 2007). Enfin, un suivi dans infrarouge moyen à $12\mu\text{m}$ produit l'excès habituel dans les comptages normalisés, que nous modélisons au moyen des populations de galaxies normales du modèle PEGASE.3 (Fioc et al. 2011) et d'une petite population supplémentaire de galaxies massives ultra-lumineuses dans l'infrarouge et évoluant selon un scénario de galaxies elliptiques (Seymour et al. 2007; Rocca-Volmerange et al. 2007).

Dans ce mémoire, je propose des analyses statistiques complémentaires du relevé ESO-Sculpteur. D'abord, j'évalue le niveau de significativité de la sur-densité marquée située dans l'intervalle $0.41 < z < 0.46$, soit 170 Mpc en distance comobile, et présentant un contraste de densité de 2.1. Pour cela j'utilise la fonction de corrélation le long de la ligne-de-visée et en séparation projetée. J'obtiens 2.6σ ou 3.3σ si je considère ou non cette structure inhabituelle dans le calcul de la fonction de corrélation, cette structure causant un excès de signal aux échelles entre 3 et 10 Mpc qui n'est pas observé dans les mesures effectuées à partir de relevés plus volumineux.

Je propose en outre une autre estimation de la fréquence d'occurrence de telles structures en utilisant les simulations du "Millennium". Pour cela j'extrait 363 pinceaux étroits de même géométrie que le relevé ESO-Sculpteur, et dans lesquels je recherche des fluctuations de densité avec les mêmes caractéristiques que la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$. La probabilité est faible, de 1 à 3% selon la référence utilisée, indiquant que de telles structures sont rares. Si la sur-densité détectée dans le relevé ESO-Sculpteur s'étendait angulairement sur 2×2 degré-carrés avec le même contraste de densité de ~ 2.1 , elle atteindrait un niveau de significativité de 4 à 5 σ , et serait plus difficile à réconcilier avec les résultats des simulations numériques.

Par comparaison avec les types spectro-photométriques obtenus par l'ajustement des scénarios évolutifs PEGASE, nous montrons des différences systématiques avec la classification spectrale, cette dernière étant resserrée autour du type central Sbc. Nous montrons que ces différences ont un lien avec l'orientation relative des fentes par rapport à l'orientation du grand axe des objets en projection sur le ciel @. Je montre par ailleurs que des très grandes fluctuations telles que la sur-densité à $0.41 < z < 0.46$ peuvent être détectées au moyen des décalages vers le rouge photométriques lorsque la précision de la photométrie optique est au plus de 0.01 mag., ou 0.05 mag. si l'on dispose de surcroît de la photométrie infrarouge proche. En revanche, une mesure précise à 1% des décalages photométriques dans l'intervalle $0 < z < 0.7$ nécessite la photométrie optique et infrarouge, avec une dispersion maximale de ~ 0.01 mag..

Ces analyses à partir des simulations du Millennium et des mesures de décalages vers le rouge photométriques posent des limites intéressantes sur la capacité des futurs relevés tels que le "Dark Energy Survey" et le "Large Synoptic Survey", ainsi que le projet "EUCLID", à détecter des structures atypiques dans la distribution spatiale des galaxies.

Le catalogue EFIGI

Dans la deuxième partie du mémoire, je présente le relevé morphologique EFIGI. Celui-ci a produit un catalogue de galaxies proches avec images bien résolues dans les bandes *ugriz* du relevé SDSS, et couvrant 6670 deg^2 du ciel. La morphologie visuelle se présente sous la forme de 16 attributs de forme, et du type de Hubble. Ces attributs fournissent pour la première fois de une description quantitative de la séquence de Hubble en terme de rapport bulbe-sur-total et d'enroulement des bras spiraux. La fréquence des barres et anneaux est mesurée pour tous les types morphologiques. On confirme que les galaxies de types spirals Sa, Sab, Sb, Sbc, Sc, Scd sont de grands systèmes et que les naines de ce type sont rares ; seul deux objets sont trouvés dans le catalogue. En revanche, les galaxies de type Sd, Sdm, Sm sont systématiquement plus petites que les spirales Sa à Scd, avec une décroissance progressive le long de la séquence, et les galaxies cE, Im et dE sont bien des galaxies naines.

Dans un deuxième temps, j'ai utilisé le catalogue EFIGI pour tester les nouveaux ajustements multi-profil insérés par E. Bertin dans SExtractor. Une somme d'un bulbe avec profil "de Vaucouleurs" et d'une disque exponentiel fournit des mesures en très bon accord avec les magnitudes d'ouverture, et présente l'avantage de récupérer la fraction du flux manquant qui varie systématiquement avec le type morphologique. L'ajustement des modèles permet aussi de s'affranchir des problèmes de contamination qui affectent les magnitudes d'ouverture.

Ces nouvelles mesures des magnitudes des galaxies de l'échantillon EFIGI me permet de montrer que l'analyse effectuée par la chaîne de traitement du SDSS morcelle 9% des galaxies d'EFIGI en différentes unités, ce qui crée un déficit de flux dans les mesures, qui peut atteindre 10 magnitudes. En outre, l'ensemble des galaxies d'EFIGI (à $g \simeq 9 - 14$) présentent un déficit systématique de flux de 2 à 0.5 mag. (des plus brillantes vers les plus faibles), à cause d'une sur-estimation croissante du fond de ciel pour les objets étendus. De nombreuses sources des catalogues photométriques du SDSS sont en outre des artefacts, et cela ramène la complétude photométrique du catalogue EFIGI à plus de 80% aux magnitudes brillantes dans les 5 filtres. La comparaison des magnitudes "MODEL" de SExtractor

Ces mesures fiables des magnitudes des galaxies d'EFIGI me permet de revisiter la relation couleur-magnitude des galaxies. Je confirme qu'il n'y a pas de bi-modalité dans ce plan, mais un glissement progressif selon les types morphologiques. Les erreurs de photométrie des catalogue du SDSS contribuent en outre à rétrécir les intervalles de couleur et de magnitudes pour les galaxies de différents types morphologiques. Ainsi, les pics ou vallées de densité éventuellement détectés dans d'autres analyses dépendent des effets de sélection sur les types morphologiques de l'échantillon considéré.

Je montre ensuite que les types spectro-photométriques obtenus par l'ajustement des scénario de PÉGASE.2 (via ZPEG) montre une dispersion importante en comparaison avec les types morphologiques. L'effet principal est le rougissement des distributions en énergie spectrale causée par l'inclinaison des galaxies, qui cause une dispersion des types spectro-photométriques sur plusieurs types morphologiques, ainsi qu'un décalage systématique vers les types spectro-photométriques plus précoces pour les galaxies spirales de morphologie Sa jusqu'à Scd.

J'examine ensuite les fonctions de luminosité de l'échantillon EFIGI. La fonction globale est bien ajustée par une loi de Schechter. Le catalogue EFIGI permet pour la première fois à partir d'une photométrie de qualité et pour de grands échantillons statistiques de calculer les fonctions de luminosité par type morphologique. Je retrouve les fonctions bornées pour les galaxies elliptiques, lenticulaires et spirales géantes, et les fonctions croissantes aux faibles magnitudes pour les spirales tardives, pour les irrégulières et les naines elliptiques. L'utilisation de la photométrie des catalogues du SDSS introduit des biais causant un déficit d'objets aux magnitude brillantes et faibles pour tous les types. J'utilise le catalogue EFIGI pour illustrer le mélange dramatique des types morphologiques lorsqu'on utilise une séparation en couleur ou en type spectro-photométrique.

Enfin, je présente des résultats préliminaires concernant les couleurs des bulbes et des disques ajustés par SExtractor sur les galaxies du catalogue EFIGI. Les couleurs des disques des spirales exhibent un bleuissement progressif le long de la séquence de Hubble, alors que les bulbes sont aussi rouges ou plus rouges que ceux des elliptiques, suggérant un rougissement par les poussières, principalement pour les spirales de types Sa, Sab, Sb et Sbc.

Perspectives

Les différences systématiques mises en évidence entre les types spectraux, les types spectro-photométriques, et les types morphologiques illustrent la difficulté à déterminer de façon cohérente le type d'une galaxie proche ou lointaine. Parce la morphométrie est étroitement liée à d'autres descripteurs majeurs des galaxies (flux, contenu stellaire, masse), elle apparaît comme une approche performante pour effectuer une séparation univoque des différents types physiques de galaxies. La morphométrie permet en outre la mesure des fonctions de luminosité intrinsèques, qui sont non seulement utiles pour contraindre les mécanismes de formation des galaxies au sein des halos de matière noire, mais constituent aussi des outils indispensables pour déterminer les effets de sélection dans les relevés observationnels, systématiquement limités en flux. Ainsi, les fonctions de luminosité sont l'outil de base pour prédire les distributions de comptages, et ont des répercussions majeures sur l'évolution des galaxies lorsque l'on considère par exemple l'infrarouge moyen. Un complément important dans le calcul des fonctions de luminosité sera la prise en compte des limitations en brillance de surface (voir Cross & Driver 2002).

Les effets systématiques dans la photométrie des galaxies brillantes du relevé SDSS, que nous avons mis en évidence, montrent le fait que la performance des logiciels de mesure dépend de l'objectif scientifique qui est fixé, et peuvent affecter de façon importante la photométrie des galaxies proches. Ayant montré que le relevé SDSS ne permet pas un recensement complet et photométriquement fiable de l'Univers proche, une réanalyse de l'ensemble du relevé SDSS est nécessaire jusqu'à au moins $g \sim 17$. Ce projet sera démarré en 2011 à l'IAP, avec pour objectif de fournir à la communauté astronomique une photométrie précise pour les galaxies de l'Univers proche, ainsi que la mesure de leurs paramètres morphométriques.

La qualité des images du relevé SDSS, et la grande couverture angulaire offre l'opportunité unique d'élaborer un catalogue complet à $z \simeq 0.1$, qu'il serait dommage de ne pas explorer. Cela requiert des capacités de stockage et de calcul important, que notre équipe a pu acquérir et installer à l'IAP. L'idéal serait de mettre en place un service web qui fournira les images fits et les paramètres morphométriques de toutes les galaxies jusqu'à $g \simeq 17$, soit $\sim 100,000$ galaxies. Ce catalogue représentera un échantillon statistique sans précédent, de par le nombre d'objets, la qualité photométrique, et l'éventail complet des différents types et particularités morphologiques. L'analyse qui sera effectuée permettra en outre de tester la photométrie des catalogues de galaxies fournis par le projet SDSS aux magnitudes $g > 17$, dans un domaine de flux où la photométrie ne devrait pas être affectée par les erreurs systématiques présentées ici.

Les fonctions de luminosité et de corrélation, permettant de caractériser les différentes populations de galaxies et leur regroupement à grande échelle, pourront alors être mesurées avec une excellente statistique en fonction des nombreuses caractéristiques morphologiques identifiées. On pourra aussi revisiter la controverse sur les relations et distinctions entre les galaxies elliptiques et les galaxies naines elliptiques, ainsi qu'entre les galaxies elliptiques géantes et aux cœurs défectueux en lumière, et les elliptiques plus petites, en rotation, présentant un excès central de lumière (Graham 2005; Kormendy et al. 2009; Kormendy 2009). L'existence de traces morphométriques résultants de la distinction dynamique entre les galaxies elliptiques et lenticulaires (Cappellari et al. 2011) pourra aussi être examinée.

Ce recensement complet des galaxies de l'Univers proche donnera en outre la possibilité de comparer les propriétés spectrales avec les propriétés morphologiques des galaxies SDSS, et de mieux contraindre les spectres de références auxquels les divers modèles de synthèse spectrale sont confrontés. Cela devrait conduire à une amélioration de la performance des techniques de classification spectro-photométrique et de mesure des décalages vers le rouge photométriques. Une étape déterminante sera l'ajout dans les modèles des scénarios manquants parmi les types morphologiques mis en évidence par EFIGI galaxies, comme par exemple les galaxies naines elliptiques. La définition d'un nouveau scénario nécessite des mesures statistiques en quantité et qualité suffisantes au temps présent pour modéliser les divers diagrammes couleur-couleur. Une meilleure compréhension de l'ajustement des spectres de référence pour la mesure des décalages vers le rouge photométriques est importante pour les mesures d'oscillations baryoniques acoustiques (Eisenstein et al. 2005), ainsi que pour celles du cisaillement gravitationnel, la distribution des sources en décalage spectral ayant un impact déterminant sur les résultats (Fu et al. 2008).

Les ajustements de modèles bi-dimensionnels de bulbe + disque effectués sur les galaxies du catalogue EFIGI au moyen de SExtractor (Bertin et al. 2011) donnent des résultats prometteurs sur les mesures statistiques des propriétés des bulbes et des disques. Les mesures de fonctions de luminosité pour les

composantes de bulbe et de disque des galaxies seront intéressantes pour une comparaison avec les simulations à N-corps (voir par exemple Baugh et al. 1996; Kauffmann et al. 1997; Cole et al. 2000). La modélisation des profils devrait servir à évaluer les biais d'inclinaison sur la photométrie des galaxies, pour une prise en compte dans les analyses des catalogues de galaxies distantes. Ce travail devra se baser sur les mesures de profil des composantes de bulbe et de disque effectuées sur les galaxies bien résolues du catalogue EFIGI, puis sur l'ensemble du relevé SDSS, afin d'échantillonner les populations de galaxies dans des conditions réalistes.

On pourra par ailleurs montrer quel est l'effet des biais d'ouverture et des erreurs sur la calibration en flux des spectres obtenus par fibre optique, qui affectent peut-être la spectroscopie des galaxies les plus distantes du relevé SDSS. Celle-ci a été largement utilisée pour déduire des contraintes sur l'évolution des galaxies et montrer l'effet de "down-sizing". On peut imaginer des effets liés aux composantes de bulbe et disque des différents types morphologiques.

Les attributs morphologiques visuels du catalogue EFIGI, et les résultats conjoints des simulations numériques de formation des galaxies nous aiguillent sur les développements critiques à introduire dans les ajustements de profil. Des composantes de barre et d'anneau, et une bande de poussière pour les galaxies inclinées, peuvent par exemple être ajoutées. Mais les dégénérescences doivent être testées au moyen d'images simulées si l'on souhaite une application "automatique" à de grands échantillons.

Les images résiduelles de l'ajustement bulbe + disque de SExtractor peuvent aussi être utilisées pour étudier les autres composantes des galaxies. D'une part, une méthode de détermination automatique et quantitative de la flocculence des galaxies a été effectuée sur les galaxies du catalogue EFIGI (Dumoncel et al. 2008). Au cours de sa thèse, A. Baillard a par ailleurs testé l'ajustement linéaire d'anneaux multipolaires sur ces résidus, dans le but de modéliser les bras spiraux, les anneaux et les barres. Ces ajustements permettent d'obtenir une réduction dimensionnelle des images de galaxies avec une centaine de coefficients, et ceci indépendamment de la variation de qualité d'image (Baillard 2008). Des résultats préliminaires sur l'application d'un système d'apprentissage aux coefficients de projection sur la base d'anneaux ont été obtenus, permettant d'évaluer automatiquement et quantitativement la présence d'attributs comme les barres, les anneaux, la poussière ou la flocculence avec des taux de succès allant de 69 à 92 %. Cette approche permet aussi de mesurer le sens de rotation des bras avec un taux de succès comparable à celui des détermination visuelles pour le catalogue EFIGI (47% par apprentissage versus 55% par les astronomes). Ces résultats sont prometteurs et devront être re-explorés au moyen du catalogue EFIGI, les attributs visuels et des images bien résolues étant indispensables à ce travail.

Les outils performants d'*AstrOmatic* (<http://www.astromatic.net>) qui sont développés à l'IAP par Emmanuel Bertin et concernent la modélisation automatique de la réponse impulsionnelle et ses variations spatiales sur les images seront cruciaux pour étudier l'évolution de la morphométrie avec le décalage spectral. Des champs DEEP et WIDE du relevé CFHTLS sont en cours d'analyse morphométrique, et, par de nombreux tests, ont contribué aux améliorations apportés récemment à SExtractor. L'analyse de ces images profondes nécessitera un contrôle des mesures par simulation d'images au moyen d'un autre outil d'*AstrOmatic*, SkyMaker, afin d'évaluer quantitativement les biais et limites des algorithmes automatiques, et l'impact sur la séparation des différentes populations de galaxies. La connaissance de la morphométrie des galaxies bien résolues du catalogue EFIGI, et de l'ensemble du relevé SDSS sera en parallèle indispensable.

Les champs WIDE et DEEP du relevé "Legacy" du TCFH permettront d'explorer en détail et avec une bonne statistique les liens entre le contenu spectral, la luminosité, la masse, et la morphologie. L'intérêt de la connaissance des types morphologiques est de lever les dégénérescences spectrales, et d'obtenir une meilleure détermination des fonctions de masse par type de galaxie. Un des objectifs est de retracer l'histoire de l'accumulation de la masse dans les galaxies, en déterminant le rôle des fusions ainsi que la nature des objets dans lesquels ces fusions jouent un rôle déterminant, caractérisé notamment par des épisodes de formation d'étoiles. Un indicateur de fusions majeures pour une catégorie de galaxies serait une variation systématique du rayon d'échelle. Le défi réside dans la difficulté à isoler et suivre un même type de galaxies au cours du temps. L'analyse des comptages infrarouge-moyen montre l'étendue de la marge de modélisation, posant le dilemme récurrent entre l'évolution en nombre et l'évolution en luminosité. L'analyse des relevés optiques et infrarouge-proche des champs du CFHTLS devraient fournir des résultats discriminants.

Nous estimons pouvoir détecter et quantifier les composantes de bulbe et de disque des galaxies jusqu'à $z \sim 1$. Par les ajustements de profils, on pourra examiner comment se comportent à grand décalage spectral les relations entre la brillance de surface effective et le rayon effectif pour les bulbes (Kormendy 1977), ainsi que celle entre la brillance de surface centrale et le rayon d'échelle pour les disques (de Jong 1996; Graham et al. 2001). Il sera intéressant de reconsidérer la séquence de Hubble en terme d'histoire des bulbes et des disques. On pourra aussi examiner le rôle des barres, des anneaux, de la flocculence, et de la poussière, aux plus faibles décalages vers le rouge auxquels ces composantes seront détectées.

Les données du relevé SDSS serviront de référence à faible décalage spectral pour ces analyses à $0.5 \lesssim z \lesssim 1$. Par la mesure du regroupement spatial des galaxies, on pourra poser des contraintes sur les fonctions de distribution des différents types au sein des halos de matière noire. L'évolution avec le décalage vers le rouge permettra de confronter ces fonctions à l'histoire théorique de l'assemblage des halos. On pourra ainsi examiner directement l'évolution du lien entre la nature des galaxies et leur environnement. Nous estimons que cette connaissance détaillée des propriétés des galaxies proches et lointaines, en comparaison avec les simulations numériques à venir, qui allieront résolution et grand volume, marquera des avancées substantielles.

Références

- Arnouts, S., de Lapparent, V., Mathez, G., et al. 1997, *A&AS*, 124, 163
- Baillard, A. 2008, Détermination automatique des paramètres morphologiques des galaxies (Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications)
- Baugh, C. M., Cole, S., & Frenk, C. S. 1996, *MNRAS*, 283, 1361
- Bellanger, C. & de Lapparent, V. 1995, *ApJ*, 455, L103
- Bellanger, C., de Lapparent, V., Arnouts, S., et al. 1995, *A&AS*, 110, 159
- Bertin, E., Delorme, P., Baillard, A., Marmo, C., & Semah, G. 2011, in preparation
- Cappellari, M., Emsellem, E., Krajnovic, D., et al. 2011, ArXiv e-prints
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, *MNRAS*, 319, 168
- Cross, N. & Driver, S. P. 2002, *MNRAS*, 329, 579
- de Jong, R. S. 1996, *A&A*, 313, 45
- de Lapparent, V. 2003, *A&A*, 408, 845
- de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., & Bardelli, S. 2004, *A&A*, 422, 841
- de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., & Arnouts, S. 2003, *A&A*, 404, 831
- de Lapparent, V. & Slezak, E. 2007, *A&A*, 472, 29
- Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., et al. 2008, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 394, *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, ed. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, & J. R. Lewis, 497
- Eisenstein, D. J., Blanton, M., Zehavi, I., et al. 2005, *ApJ*, 619, 178
- Fioc, M., Rocca-Volmerange, B., & Dwek, E. 2011
- Fu, L., Semboloni, E., Hoekstra, H., et al. 2008, *A&A*, 479, 9
- Graham, A. W. 2005, in *IAU Colloq. 198: Near-fields cosmology with dwarf elliptical galaxies*, ed. H. Jerjen & B. Binggeli, 303–310
- Graham, A. W., Trujillo, I., & Caon, N. 2001, *AJ*, 122, 1707
- Kauffmann, G., Nusser, A., & Steinmetz, M. 1997, *MNRAS*, 286, 795
- Kormendy, J. 1977, *ApJ*, 218, 333
- Kormendy, J. 2009, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 419, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, ed. S. Jogee, I. Marinova, L. Hao, & G. A. Blanc, 87–+
- Kormendy, J., Fisher, D. B., Cornell, M. E., & Bender, R. 2009, *ApJS*, 182, 216
- Rocca-Volmerange, B., de Lapparent, V., Seymour, N., & Fioc, M. 2007, *A&A*, 475, 801
- Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., & de Lapparent, V. 2007, *A&A*, 475, 791

Cinquième partie

EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE ET PUBLICATIONS

Curriculum Vitae

Née le 19 novembre 1962
2 fils, nés en 1991 et 1994
divorcée

Diplômes :

1979	Baccalauréat C, Académie de Versailles
1982	Licence de Physique, Université Paris 6
1982	Maîtrise de Physique, Université Paris 6
1983	D.E.A. d'Astronomie et Techniques Spatiales, Université Paris 7
1986	Doctorat d'Astrophysique, Université Paris 7

Scolarité :

1979–1981	Mathématiques Supérieures, Lycée Louis-le-Grand, Paris
1980–1981	Mathématiques Spéciales P', Lycée Louis-le-Grand, Paris
1981–1985	Ecole Normale Supérieure, Sèvres
1983–1985	Echange ENS-Harvard University, Center for Astrophysics, USA
1985–1986	CfA Pre-Doctoral Fellow, Center for Astrophysics, USA

Emplois :

1985	Assistante, Harvard University
1986–1988	CfA Post-doctoral Fellow, Center for Astrophysics
1988–1992	Chargée de Recherche 2 ^{ème} classe du CNRS, Institut d'Astrophysique de Paris
1992–	Chargée de Recherche 1 ^{ère} classe du CNRS, Institut d'Astrophysique de Paris

Divers :

1984–1986	Bourse Amelia Earhart, Zonta International
1989	Médaille de Bronze du CNRS

Chapitre 1

Expérience professionnelle

1.1 Encadrement

1.1.1 Stagiaires

J'ai dirigé trois stages de DEA et de Maîtrise, effectués à l'IAP par :

- Jean-Philippe Boulanger en 1990 (DEA) ;
- Christèle Bellanger en 1991 (DEA) ; actuellement dans l'enseignement privé ;
- Benoît Revenu en 1992 (Maîtrise) ; actuellement chargé de recherche au CNRS (Section 03) à SUBATECH-Nantes

1.1.2 Doctorants

J'ai dirigé et co-dirigé les quatre thèses de doctorat, effectuées à l'IAP par :

- Christèle Bellanger, diplôme obtenu en septembre 1995 ; actuellement dans l'enseignement privé ;
- Stéphane Arnouts, diplôme obtenu en septembre 1996 ; actuellement chargé de recherche au CNRS (Section 17) dans le Laboratoire d'Astrophysique de Marseille ;
- Gaspar Galaz, diplôme obtenu en septembre 1997 ; actuellement professeur assistant à l'Université Catholique du Chili, Santiago.
- Anthony Baillard, diplôme obtenu en décembre 2008 ; thèse dirigée en co-tutelle par A. Bijaoui (Obs. Nice-Côte d'Azur) et E. Bertin (IAP) ; actuellement dans le privé

1.1.3 Post-Doctorants

J'ai supervisé et supervise les séjours post-doctoraux à l'IAP de :

- Rémi Cabanac (1998-2000), actuellement directeur du Télescope Bernard Lyot ;
- Nick Seymour (2002-2004) ; actuellement au Mullard Space Science Laboratory, Univ. College London (Royaume-Uni) ;
- Yuko Kakazu (2007-2009) ; actuellement post-doctorante à Caltech (Etats-Unis).

1.2 Responsabilités scientifiques

En 1989, un an après mon recrutement au CNRS, j'ai initié, coordonné et mené à terme un programme-clé de l'ESO.

Je fus activement impliquée dans le conseil scientifique du GdR “Cosmologie”, qui allait conduire à la création du Programme National de Cosmologie (PNC) en 1996 (puis au PNCG).

J’ai aussi fait partie du groupe scientifique qui a porté le projet MEGACAM/CFHTLS depuis ses débuts (projet “LITE” : Vigroux, de Lapparent, Mellier *et al.* 1993) jusqu’au financement de la caméra, sa construction, et la définition des relevés “Legacy”.

En mars 2005, j’ai pris l’initiative et la responsabilité du groupe de recherche “Origine et Evolution des Galaxie” à l’IAP, auquel sont rattachés 13 chercheurs permanents, et en moyenne 10 doctorants et post-doctorants (voir pages du groupe : http://www2.iap.fr/users/lapparent/formation_evolution_galaxies.shtml),

Récapitulatif de l’ensemble des responsabilités scientifiques :

- Membre du conseil scientifique du GdR Cosmologie de 1991 à 1996 ;
- Membre du comité d’attribution du temps de télescope à l’ESO de 1995 à 1996 ;
- Membre du comité d’élaboration du projet MEGACAM/CFHTLS de 1992 à 2000 ;
- Responsable du groupe de recherche “Origine et Evolution des Galaxies” depuis 2005 ;
- Présidente du conseil scientifique de l’OSU IAP depuis mars 2007.

1.3 Animation de la recherche

Dans le cadre du groupe de recherche “Origine et Evolution des Galaxies” à l’IAP (recherche “google : journal-club galaxies”), j’anime un journal-club hebdomadaire qui inclut :

- des présentations de travaux effectuées par les membres du groupe, par leurs visiteurs étrangers, et par d’autres collègues de l’IAP et de laboratoires nationaux
- des séances de discussion critique d’articles récemment mis en pré-publication
- des discussions de prospective scientifique, orientée en partie vers l’interprétation des grands relevés multi-longueur d’onde.

1.4 Responsabilités administratives

Je fus membre nommée (de 1992 à 1995), puis élue (de 2001 à 2005) du conseil de laboratoire de l’IAP.

Je suis responsable depuis 1998 de l’accueil des visiteurs et nouveaux arrivants à l’IAP (doctorants, post-doctorants, visiteurs et stagiaires ; 250 personnes par an). Le système mis en place fournit le cadre logistique indispensable au bon fonctionnement des nombreuses collaborations internationales des chercheurs de l’IAP.

1.5 Diffusion de la connaissance scientifique

Je participe depuis mon entrée au CNRS à des activités de diffusion de l’astrophysique auprès de publics divers :

- conférences en milieu universitaire et scolaire (primaire, secondaire, classes préparatoires),
- conférences grand public (dont AMA09 et journées du patrimoine),
- accueil de classes (primaire et secondaire) à l’IAP pendant la “ Science en Fête”,
- rédaction d’articles de vulgarisation,
- relecture d’articles écrits par des journalistes scientifiques,

dont notamment :

- conception et développement d’un site web de diffusion (<http://www.harmoniacelestis.net>),
- interventions dans des films de vulgarisation scientifique (on peut visionner un reportage récent sur les images du relevé CFHTLS sur ma page personnelle <http://www2.iap.fr/users/lapparent>)
- participation à l’exposition et au livre “1000 chercheurs parlent d’avenir” par Pierre Maraval

1.5.1 Conférences grand public

Mars 2011	Centre de conférence Atria, Belfort “La tapisserie cosmique: galaxies et grandes structures” <i>Printemps des Planétariums</i>
Septembre 2010	Observatoire Camille Flammarion, Juvisy “Galaxies et grandes structures de l’Univers” <i>Journées du Patrimoine</i>
Décembre 2009	Institut de Physique, Université de Strasbourg “Galaxies, grandes structures, et vides cosmiques” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société Française de Physique, Section Alsace</i>
Septembre 2009	Institut d’Astrophysique de Paris “Vides cosmiques et murailles intergalactiques dans l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles, Institut d’Astrophysique de Paris</i>
Mai 2009	Université de Caen “Tapisserie cosmique: galaxies, vides et murs” <i>Grande conférence “Année Mondiale de l’Astronomie 2009”</i>
Avril 2009	Collège Georges Sand, Châtellerauld “Galaxies et Grandes Structures dans l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société des Sciences de Châtellerauld</i>
Décembre 2008	Salle Bretagne, Nantes “Les grandes structures de l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société Astronomique de Nantes</i>
Novembre 2008	Grand Palais, Paris “Les grandes structures de galaxies dans l’Univers” <i>Exposition “Paris Ville Européenne des Sciences”</i>
Octobre 2007	FIAP, Paris 13 ^e “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides Cosmiques, et Murailles Intergalactiques” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société d’Astronomie Française</i>
Mars 1998	Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications “La Structure à Grande Echelle de l’Univers ” <i>Cycle de conférences mensuelles, Club d’Information Scientifique des PTT</i>
Mai 1997	Uranoscope de Gretz-Armainvilliers “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides et Murs” <i>Conférence</i>
Octobre 1996	Institut d’Astrophysique de Paris “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides et Murs” <i>“La Science en Fête”</i>

Juin 1996	Ecole des Mines de Paris “Les Grandes Structures de l’Univers : Galaxies, Vides et Murs” <i>Conférence</i>
Novembre 1995	Institut d’Astrophysique de Paris “Une Tapisserie Cosmique : Les Grandes Structures de l’Univers” <i>Cycle de conférences mensuelles</i>
Juin 1993	Ecole Polytechnique, Palaiseau “Cartographier la Distribution des Galaxies” <i>Conférence</i>
Juin 1992	Ecole Polytechnique, Palaiseau “Observation de la Distribution des Galaxies” <i>Conférence</i>
Mars 1992	Saint-Genis Laval “Cartographier l’Univers à Grande Echelle ” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société Astronomique de Lyon</i>
Février 1991	Institut Océanographique “Les Structures de l’Univers à Grande Echelle” <i>Cycle de conférences mensuelles, Société d’Astronomie Française</i>
Novembre 1990	Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris “Les Structures de l’Univers à Grande Echelle” <i>Journées “Actualités en Astronomie”, AFAS/SAF</i>
Février 1990	Université Paris VII “La Distribution des Galaxies” <i>Association Femmes et Mathématiques</i>
Décembre 1986	Center for Astrophysics, Cambridge “Cosmic Bubbles” <i>Amateur Telescope Makers Monthly Meeting</i>
Octobre 1986	Center for Astrophysics, Cambridge “Bubbles in the Universe: Nature’s Largest Structures?” <i>Monthly Popular Observatory Night</i>
Octobre 1985	Holiday Inn, Woburn “Bubbles and Voids in the Galaxy Distribution” <i>Zonta International Award Ceremony</i>

1.5.2 Conférences d’éveil et de formation

Octobre 2010	Institut d’Astrophysique de Paris “Observer les galaxies dans l’Univers, et appréhender l’échelle des distances” <i>Accueil de 2 classes de CM2 pour “La Science en Fête”</i>
--------------	---

Mai 2010	Lycée Jean Rostand de Caen “Les grandes structures de l’Univers” <i>Journée de formation en Astronomie pour professeurs de Mathématiques, Physique et Sciences et Vie de la Terre (CLEA)</i>
Décembre 2009	Lycée Malherbe de Caen “Cartographier l’Univers : distances, galaxies et grandes structures” <i>Présentation pour classes préparatoires (2 classes de MPSI)</i>
Octobre 2009	Lycée André Maurois de Deauville “Les galaxies dans l’Univers : distances et grandes structures” <i>Présentation pour lycéens (2 classes de 2^{nde})</i>
Avril 2009	Institut d’Astrophysique de Paris “Du système solaire aux galaxies : échelle des distances dans l’Univers” <i>Accueil d’une classe de Terminale S du Lycée Saint Nicolas, Paris 15^e</i>
Novembre 2008	Institut d’Astrophysique de Paris “Observer les galaxies dans l’Univers, et appréhender l’échelle des distances” <i>Accueil de 2 classes de CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2007	Institut d’Astrophysique de Paris “Du système solaire aux galaxies : échelle des distances dans l’Univers” <i>Accueil de 4 classes de CE1, CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2007	Lycée Technique “Ecole Nationale de Chimie”, Paris 13 ^e “La structuration de l’Univers à Grande Echelle” <i>Présentation à 2 classes de 2^{nde} pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2006	Institut d’Astrophysique de Paris “Combien l’Univers est grand : échelle des distances et galaxies” <i>Accueil de 3 classes de CE1, CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2005	Ecole primaire, classe de CM, Paris 13 ^e “Combien l’Univers est grand : échelle des distances et galaxies” <i>Intervention pour “La Science en Fête”</i>
Octobre 2004	Institut d’Astrophysique de Paris “Combien l’Univers est grand : échelle des distances et galaxies” <i>Accueil de 2 classes de CM1 et CM2 pour “La Science en Fête”</i>
Avril 2004	Institut d’Astrophysique de Paris “Les outils de l’astronomie moderne pour cartographier la distribution des galaxies dans l’Univers” <i>Cours d’Astronomie Moderne pour étudiants de “Sciences Politiques”</i>
Février 1990	Universités Paris VII et Paris XI, Meudon “Les Grandes Structures de Galaxies” <i>Conférence au DEA d’Astronomie et Techniques Spatiales</i>
Janvier 1989	Universités Paris VII et Paris XI, Meudon “Observations des Grandes Structures de l’Univers Proche. Perspectives Futures” <i>Conférence au DEA d’Astronomie et Techniques Spatiales</i>

Novembre 1986 Center for Astrophysics, Cambridge
 “Bubbles and Voids”
 Cours d’Astronomie Moderne pour étudiants en journalisme scientifique

Chapitre 2

Publications

Articles acceptés :

- 2011 “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology”
Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R.,
Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A.,
Tasca, L., A&A, sous presse, astro-ph/1103.5734
- 2011 “The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology. II. Statistical properties
along the Hubble sequence”
de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E., A&A, sous presse, astro-ph/1103.5735

Articles parus dans revue avec comité de lecture :

- 2007 “The 12 μ m ISO-ESO-Sculptor and 24 μ m Spitzer faint counts reveal a population of ULIRG
as dusty massive ellipticals. Evolution by types and cosmic star formation”
Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent, V.**, Seymour, N., Fioc, M., A&A 475, pp. 801–812
- 2007 “A 12 μ m *ISOCAM* survey of the ESO-Sculptor field II. Data Reduction and Analysis”
Seymour, N., Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent, V.**, A&A 475, pp. 791–799
- 2007 “Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy
type at redshifts 0.1–0.5”
de Lapparent, V., Slezak, E., A&A 472, pp. 29–49
- 2007 “The Large Zenith Telescope - A 6-meter Liquid-Mirror Telescope”
Hickson, P., Pfrommer, T., Cabanac, R., Crottes, A., Johnson, B., **de Lapparent, V.**,
Lanzetta, K., Gromoll, S., Mulrooney, M., Sivanandam, S., Truax, B., PASP 119, pp. 444–
455
- 2004 “The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1–0.5”
de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S., A&A 422, pp. 841–863
- 2003 “Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift sur-
veys”
de Lapparent, V., A&A 408, pp. 845–872
- 2003 “The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts
0.1–0.5”
de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S., A&A 404, pp. 831–860

- 2002 “Classification and redshift estimation by principal component analysis”
Cabanac, R. A., **de Lapparent, V.**, Hickson, P., *A&A* 389, pp. 1090–1116
- 2000 “Evolution of faint galaxy clustering. The 2-point angular correlation function of 20,000 galaxies to $V < 23.5$ and $I < 22.5$ ”
Cabanac, R. A., **de Lapparent, V.**, Hickson, P., *A&A* 364, pp. 349–368
- 1998 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: Spectral Classification at $z \leq 0.5$ ”
Galaz, G., **de Lapparent, V.**, *A&A* 332, pp. 459–478
- 1997 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: The Photometric Sample”
Arnouts, S., **de Lapparent, V.**, Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., Bertin, E., & Kruszewski, A., *A&A Suppl* 124, pp. 1–21
- 1995 “Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances”
Bellanger, C., **de Lapparent, V.**, *Ap. J. Lett.* 455, pp. L103–L107
- 1995 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: The Spectroscopic Sample”
Bellanger, C., **de Lapparent, V.**, Arnouts, S., Mathez, G., Mazure, A., Mellier, Y., *A&A Suppl* 110, pp. 159–171
- 1993 “Objective Detection of Voids and High-Density Structures in the First CfA Redshift Survey Slice”
Slezak, E., **de Lapparent, V.**, & Bijaoui, A., *Ap. J.* 409, pp. 517–529
- 1991 “Measures of Large-Scale Structure in the CfA Redshift Survey Slices”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., *Ap. J.* 369, pp. 273–286
- 1990 “The CfA Redshift Survey: Data for the NGP +30 Zone”
Huchra, J., Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, Corwin, H., *Ap. J. Suppl* 72, pp. 433–470
- 1989 “The Luminosity Function for the CfA Redshift Survey Slices”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., *Ap. J.* 343, pp. 1–17
- 1988 “The Mean Density and Two-Point Correlation Function for the CfA Redshift Survey Slices”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., *Ap. J.* 332, pp. 44–56
- 1986 “The Shane-Wirtanen Counts: Systematics and Two-Point Correlation Function”
de Lapparent, V., Kurtz, M. J., Geller, M. J., *Ap. J.* 304, pp. 585–598
- 1986 “A Slice of the Universe”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., *Ap. J. (Letters)* 302, pp. L1–L5
- 1984 “The Shane-Wirtanen Counts”
Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, M. J. Kurtz, *Ap. J. (Letters)* 287, pp. L55–L58

Communications invitées dans des congrès internationaux :

- 2005 “Observations of Large-Scale Structure”
de Lapparent, V., in Current Issues in Cosmology, eds. J.-C. Pecker, J. Narlikar (Cambridge University Press, Grande Bretagne)
- 1997 “The Large-Scale Structure of the Universe”
de Lapparent, V., European Review (John Wiley & Sons, Grande Bretagne), *Vol. 5 No. 4*, pp. 419–428
- 1996 “Mapping the Large-Scale Structure”
de Lapparent, V., in Cosmology and Large Scale Structure, Les Houches, Session LX, eds. R. Schaeffer *et al.* (Elsevier Science, Amsterdam), pp. 107–132
- 1994 “Mapping the Large-Scale Structure”
de Lapparent, V., in Astronomy from Wide-Field Imaging, IAU Symposium, No 161, eds. H. T. MacGillivray *et al.* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht), pp. 669–686
- 1993 “Mapping the Large-Scale Galaxy Distribution”
de Lapparent, V., in Particle Astrophysics, IVth Rencontres de Blois, eds. J. Tran Thanh Van *et al.* (Editions Frontières, Gif-sur-Yvette), pp. 281–298
- 1989 “The Mean Density from the Galaxy Distribution”
de Lapparent, V., in The Quest for the Fundamental Constants in Cosmology, XXIVth Rencontres de Moriond, eds. J. Audouze *et al.* (Editions Frontières, Gif-sur-Yvette), pp. 103–109
- 1989 “Cosmologie, Sondages Profonds”
de Lapparent, V., in Quels Programmes Prioritaires pour le VLT en 1994/95, ed. D. Al-loin (Observatoire de Paris-Meudon), pp. 281–283
- 1987 “The Center for Astrophysics Redshift Survey: Statistical Measures of Large-Scale Clustering”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., in Thirteenth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, ed. M. Ulmer (World Scientific, Singapore), pp. 281–283

Contributions écrites invitées :

- 1997 “La Structure de l’Univers à Grande Echelle : des Galaxies aux Superamas”
de Lapparent, V., in Compte-Rendus de l’Académie des Sciences, 324 Série Iib, pp. 785–798
- 1991 “Extragalactic Voids”
de Lapparent, V., in The Astronomy and Astrophysics Encyclopedia, ed. J. P. Maran (Van Nostrand Reinhold, New York), p. 952
- 1989 “Des Bulles dans la Distribution des Galaxies”
de Lapparent, V., in Bulletin de la Société Française de Physique, 73, p. 22

Communications dans des congrès internationaux :

- 2008 “An Automatic Method to Determine the Degree of Flocculence of a Galaxy”
Dumoncel, J., Campedel, M., Maître, H., Baillard, A., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Mellier, Y., Fouqué, P., Borgne, J.-F. L., Pelló, R., Makarov, D., Makarova, L., Prugniel, P., Arnouts, S. in Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII, ASP Conf. Ser., Vol. 394, eds. R. W. Argyle, P. S. Bunclark, J. R. Lewis (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), pp. 497–499
- 2002 “The different clustering of red and blue galaxies: a robust signal from $\omega(\theta)$ ”
Cabanac, R., **de Lapparent, V.**, Hickson, P. in New Era in Cosmology, ASP Conf. Ser., Vol. 283, eds. T. Shanks & N. Metcalfe. (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), pp. 129–131
- 2002 “The Large Zenith Telescope Survey: a deep survey using a 6-m liquid mirror telescope”
Cabanac, R., **de Lapparent, V.**, Hickson, P. in New Era in Cosmology, ASP Conf. Ser., Vol. 283, eds. T. Shanks & N. Metcalfe (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), pp. 132–134
- 2000 “The Large Zenith Telescope: Redshifts and Physical Parameters of Faint Objects from a Principal Component Analysis”
Cabanac, R., **de Lapparent, V.**, in Clustering at High Redshift, ASP Conf. Ser., Vol. 200, eds. A. Mazure, O. Le Fèvre, & V. Le Brun (Astronomical Society of the Pacific, San Francisco), p. 396
- 1999 “The ESO-Sculptor survey with ISO”
Rocca-Volmerange, B., **de Lapparent, V.**, Surace, C., The Elais Consortium in The Universe as Seen by ISO, ESA-SP, Vol. 427, eds. P. Cox & M. F. Kessler, p. 1053
- 1998 “The ESO-Sulptor Survey: Galaxy Populations and Luminosity Function at $z \leq 0.5$ ”
Galaz, G., **de Lapparent, V.**, in Wide Field Surveys in Cosmology, 14th IAP meeting, eds. S. Colombi, Y. Mellier & B. Raban (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette), p. 157
- 1998 “Large Zenith Telescope project: a 6-m mercury-mirror telescope”
Hickson, P., Borra, E. F., Cabanac, R., Chapman, S. C., **de Lapparent, V.**, Mulrooney, M., & Walker, G. A. in Advanced Technology Optical/IR Telescopes VI, Proceedings SPIE, Vol. 3352, ed. L. M. Stepp, pp. 226–232
- 1997 “Spectral Classification of Galaxies with $z \leq 0.5$ ”
Galaz, G., **de Lapparent, V.** in The Early Universe with the VLT, ed. J. Bergeron (Springer, Berlin), pp. 394–395
- 1988 “The Center for Astrophysics Redshift Survey”
Huchra, J. P., Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, R. Burg, in Large Scale Structures of the Universe, IAU Symposium 130, eds. J. Audouze *et al.* (D. Reidel, Dordrecht), pp. 105–112
- 1988 “The Center for Astrophysics Redshift Survey: Luminosity Function and Two-Point Correlation Function”
de Lapparent, V., Geller, M. J., Huchra, J. P., in Large Scale Structures of the Universe IAU Symposium 130, eds. J. Audouze *et al.* (D. Reidel, Dordrecht), p. 519

- 1987 “Large-Scale Structure: The Center for Astrophysics Redshift Survey”
Geller, M. J., Huchra, J. P., **de Lapparent, V.**, in Observational Cosmology, IAU Symposium 124, eds. A. Hewitt *et al.* (D. Reidel, Dordrecht), pp. 301–312
- 1986 “The Galaxy Distribution and the Large-Scale Structure of the Universe”
Geller, M. J., **de Lapparent, V.**, Kurtz, M. J., in Twelfth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Vol. 470, ed. M. Livio (Annals of the New York Academy of Sciences, New York), pp. 123–135
- 1985 “A Slice of the Universe”
Huchra, J. P., **de Lapparent, V.**, Geller, M. J., Kurtz, M. J., Horine, E., Peters, J., Tokarz, S. in Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 17, p. 857

Autres publications spécialisées :

- 1997 “The ESO-Sculptor Faint Galaxy Survey: Large-Scale Structure and Galaxy Populations at $0.1 < z < 0.5$ ”
de Lapparent, V., Galaz, G., Arnouts, S., S. Bardelli, M. Ramella, M., Messenger, 89, pp. 21–28
- 1994 “Possible Gravitational Microlensing Event”
Benetti, S., Pasquini, L., West, R., **de Lapparent, V.** in IAU Circular, Vol. 6069, ed. D. W. E. Green, p. 2
- 1993 “LITE: the Large Imaging Telescope”
Vigroux, L., **de Lapparent, V.**, Mellier, Y., Rich, J., Breuer, H. J., Lorenz, H., Marx, S., Messenger, 71, pp. 44–46
- 1993 “Mapping the Large-Scale Structure with the ESO Multi-Slit Spectrographs”
de Lapparent, V., Bellanger, C., Arnouts, S., Mathez, G., Mellier, Y., and Mazure, A., Messenger, 72, pp. 34–38
- 1991 “Multi-Object Spectroscopy with the ESO Multi-Mode Instrument at the NTT”
Dekker, H., D’Odorico, S., Kotzlowski, H., Lizon, J.-L. Longinotti, A., Nees, W., **de Lapparent-Gurriet, V.**, Messenger, 63, pp. 73–76
- 1989 “A Redshift Survey of Galaxies with $z \leq 0.6$ using Multi-Object Spectroscopy”
de Lapparent, V., Mazure, A., Mathez, G., Mellier, Y., Messenger, 55, pp. 5–6
- 1988 “Possible Supernovae”
Hansen, L., Norgaard-Nielsen, H. U., Jorgensen, H. E., Ellis, R., Couch, W., Allington-Smith, J., **de Lapparent, V.**, Mazure, A. in IAU Circular, Vol. 4641, ed. B. G. Marsden, p. 1
- 1986 “Les Grandes Structures dans la Distribution des Galaxies”
de Lapparent, V., Thèse de Doctorat, Université Paris 7

Contributions invitées pour diffusion des connaissances :

- 1997 “La Structure de l’Univers à Grande Echelle : des Galaxies aux Superamas”
de Lapparent, V., in Compte-Rendus de l’Académie des Sciences, *324 Série IIB*, pp. 785–798
- 1991 “Extragalactic Voids”
de Lapparent, V., in The Astronomy and Astrophysics Encyclopedia, ed. J. P. Maran (Van Nostrand Reinhold, New York), p. 952
- 1990 “Les Bulles de l’Univers”
de Lapparent, V., Ciel & Espace, *251*, p. 48
- 1990 “Un Univers en Forme de Bulles”
de Lapparent, V., Science & Vie Hors-Série, *170*, p. 126
- 1989 “Des Bulles dans la Distribution des Galaxies”
de Lapparent, V., in Bulletin de la Société Française de Physique, *73*, p. 22

Liste des articles choisis

Pour compléter les différents chapitres de ce mémoire, nous proposons au lecteur les huit articles ci-dessous. Ceux-ci insérés dans les chapitres correspondants, selon les numéros de pages indiqués.

Relevé ESO-Sculpteur

1. The ESO-Sculptor Faint Galaxy Redshift Survey: Spectral Classification at $z \leq 0.5$,
Galaz, G., **de Lapparent, V.**,
1998, *A&A* 332, pp. 459–478 31
2. Mapping the Galaxy Distribution at Large Distances,
Bellanger, C., **de Lapparent, V.**,
1995, *Ap. J. Lett.* 455, pp. L103–L107 59
3. Spatial clustering in the ESO-Sculptor survey: two-point correlation functions by galaxy type at redshifts 0.1–0.5,
de Lapparent, V., Slezak, E.,
2007, *A&A* 472, pp. 29–49 69
4. The ESO-Sculptor Survey: Luminosity functions of galaxies per spectral type at redshifts 0.1–0.5,
de Lapparent, V., Galaz, G., Bardelli, S., Arnouts, S.,
2003, *A&A* 404, pp. 831–860 123
5. Critical analysis of the luminosity functions per galaxy type measured from redshift surveys,
de Lapparent, V.,
2003, *A&A* 408, pp. 845–872 157
6. The ESO-Sculptor Survey: Evolution of late-type galaxies at redshifts 0.1–0.5,
de Lapparent, V., Arnouts, S., Galaz, G., Bardelli, S.,
2004, *A&A* 422, pp. 841–863 189

Catalogue EFIGI

7. The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with detailed morphology,
Baillard, B., Bertin, E., **de Lapparent, V.**, Fouqué, P., Arnouts, S., Mellier, Y., Pelló, R., Leborgne, J.-F., Prugniel, J.-P., Makarov, D., Makarova, L., McCracken, H., Bijaoui, A., Tasca, L.,
2011, *A&A*, sous presse, astro-ph/1103.5734 241
8. The EFIGI Catalogue of 4458 nearby galaxies with morphology. II. Statistical properties along the Hubble sequence,
de Lapparent, V., Baillard, B., Bertin, E.,
2011, *A&A*, sous presse, astro-ph/1103.5735 275